



HAL
open science

Modele de simulation de la culture du soja et de son fonctionnement hydrique. Estimation agrometeorologique des potentialites de production

Nadine Brisson

► **To cite this version:**

Nadine Brisson. Modele de simulation de la culture du soja et de son fonctionnement hydrique. Estimation agrometeorologique des potentialites de production. Sciences du Vivant [q-bio]. Institut National Agronomique Paris Grignon, 1989. Français. NNT: . tel-02853152

HAL Id: tel-02853152

<https://hal.inrae.fr/tel-02853152>

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON

THESE

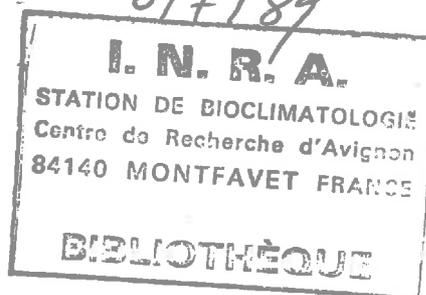
présentée par : **Nadine BRISSON**

titre : Ingénieur agronome

pour l'obtention du titre de:
DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

sujet : **MODELE DE SIMULATION DE LA CULTURE DU SOJA
ET DE SON FONCTIONNEMENT HYDRIQUE**

**ESTIMATION AGROMETEOROLOGIQUE
DES POTENTIALITES DE PRODUCTION**



ADTHG

soutenue le 16 mai 1989
devant la commission d'examen composée de MM :

- A. PERRIER, professeur INA-PG
- J. GOUDRIAAN, professeur Université Wageningen
- D. PICARD, directeur de recherche INRA-Agronomie
- B. SAUGIER, professeur Université Paris XI
- E. CHOISNEL, ingénieur en chef Météorologie Nationale
- A. MERRIEN, directeur scientifique CETIOM
- B. SEGUIN, directeur de recherche INRA-Bioclimatologie

PRESIDENT

RAPPORTEURS

Avant propos

Je remercie Alain PERRIER, qui a accepté de diriger ma thèse et a toujours été disponible pour me guider dans les choix importants.

C'est avec l'aide précieuse de Bernard SEGUIN que j'ai pu mener à bien ce travail, dont il a suivi de près l'évolution, toujours vigilant au respect d'un certain équilibre propre à l'agrométéorologie. Je l'en remercie.

J'ai réalisé ce travail au CIRAME, organisme régional à vocation d'agrométéorologie appliquée, et je voudrais exprimer toute ma gratitude à Messieurs MARTELLET, ALEMAN et RAMEL qui ont accepté que je consacre une partie importante de mon temps à une recherche un peu plus fondamentale, me faisant ainsi complètement confiance.

Je voudrais également remercier l'ensemble des personnes de la station de bioclimatologie-STEFCE de l'INRA d'Avignon qui pendant presque 3 ans, m'ont fait profiter d'un encadrement technique et scientifique de qualité.

J'ai été très sensible à l'attention du CETIOM, qui m'a confortée dans l'utilité du travail entrepris.

J'ai eu l'occasion d'aborder diverses disciplines agronomiques et je tiens à remercier tous les spécialistes qui m'ont aidée. Il s'agit, plus particulièrement, de Mlle BOUNIOLS, chercheur à l'INRA-Agronomie de Toulouse, qui m'a aidée à comprendre la physiologie du soja, de Richard DELECOLLE, chercheur en bioclimatologie à Avignon, qui m'a fait profiter de ses connaissances en matière de modélisation de culture, d'André CHANZY (INRA-science du sol AVIGNON), avec qui j'ai eu des discussions fructueuses sur le fonctionnement du sol.

J'ai pu réaliser des suivis expérimentaux sur des cultures de soja grâce à l'appui de la station du CETIOM à Montélimar, du STEFCE-INRA, de la Compagnie du Bas-Rhône et de l'INRA-Avignon. Je remercie également tous ceux qui m'ont permis d'utiliser leurs jeux de données pour valider le modèle.

Je remercie, enfin, toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à l'élaboration du document ainsi que celles qui ont accepté de le lire, de le critiquer et ont ainsi contribué à son amélioration. Je pense, en particulier, à messieurs SAUGIER, GOUDRIAAN, PICARD, CHOISNEL et MERRIEN qui, ont accepté de faire partie du jury et m'ont donné de précieux conseils pour apporter la touche finale à ce travail.

Nadine BRISSON

PLAN

page

INTRODUCTION.....	1
MODELISATION DE LA PHYSIOLOGIE DE LA PLANTE INTEGREE A L'ECHELLE DU COUVERT.....	8
A. Fonctionnement du modèle SOYGRO.....	9
I. Les différents modules de SOYGRO et leurs interactions.....	10
II. Le module de phénologie.....	11
III. Le module de croissance.....	16
IV. Le module de sénescence.....	28
V. Rôle des fonctions de stress hydrique.....	29
VI. Conclusion.....	30
B. Adaptation de SOYGRO aux variétés cultivées en France..	31
I. Analyse de sensibilité variétale.....	32
II. Adaptation du modèle pour des variétés de précocité I, II et 00.....	35
MODELISATION DU FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DE LA CULTURE DANS SON MILIEU PEDOCLIMATIQUE.....	38
C. Généralités sur le fonctionnement hydrique d'une culture de soja et sa modélisation.....	39
I. Les effets d'une contrainte hydrique.....	39
II. Fonctions de stress hydrique.....	41
III. Principes de fonctionnement du compartiment bilan hydrique des modèles de simulation de culture, un exemple : le modèle de RITCHIE.....	44



D. Elaboration d'un modèle de bilan hydrique pour les modèles de simulation de culture.....52

- I. Calcul de l'évaporation du sol.....53
- II. Calcul des besoins en eau de la plante.....56
- III. Evaluation de la disponibilité en eau.....57
- IV. Calcul des fonctions de stress.....61
- V. Synthèse du modèle.....64

VALIDATION DU MODELE DE SIMULATION DE CULTURE MIS AU POINT,
SON INTERET DANS UNE PROBLEMATIQUE AGROMETEOROLOGIQUE.....70

E. Validation.....71

- I. Validation de la phénologie.....71
- II. Validation de la croissance.....72
- III. Validation du bilan hydrique.....74
- IV. Validation du rendement et de ses composantes...78
- V. Conclusion sur les limites d'utilisation du modèle.....80

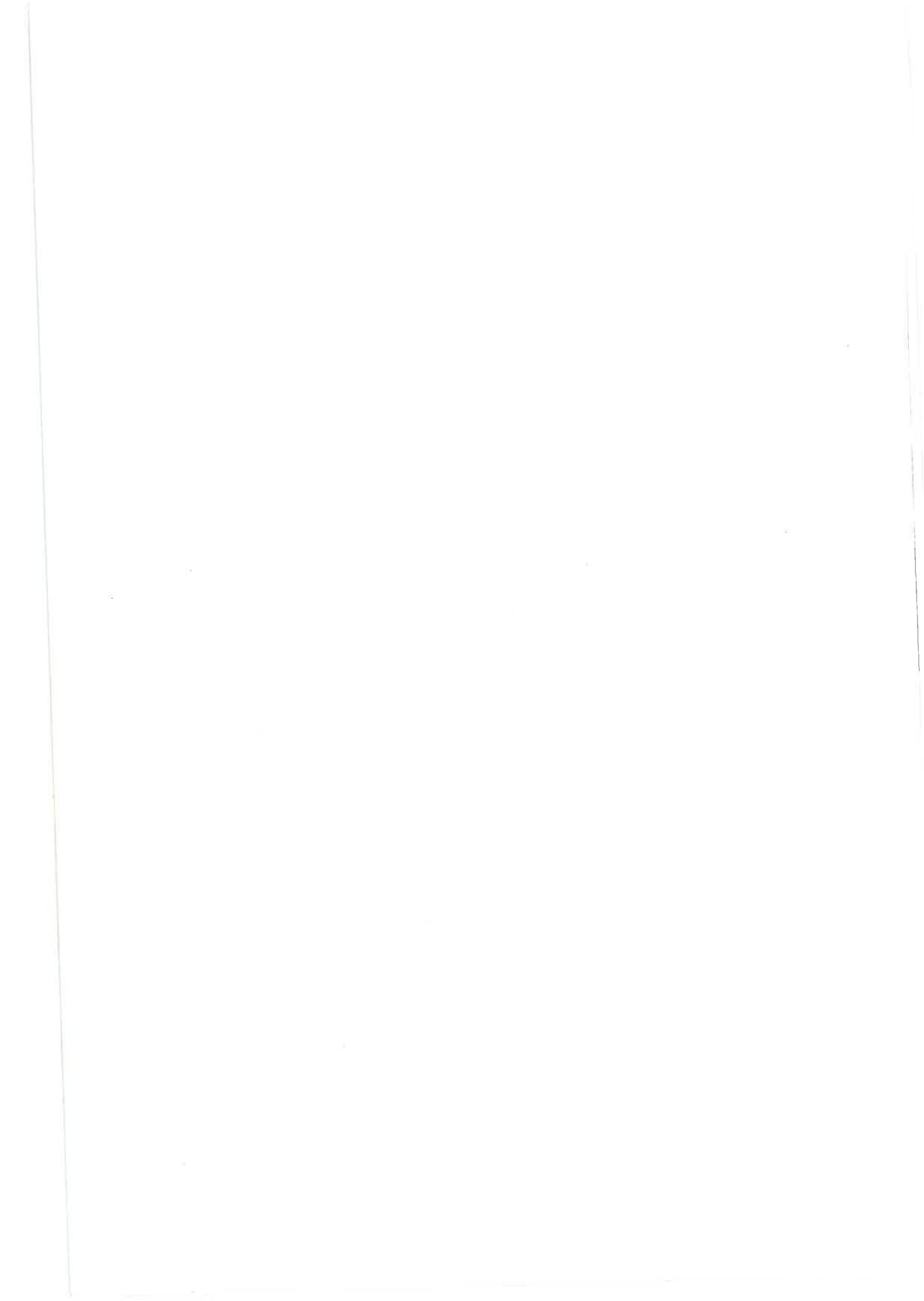
F. Conclusion : vers une étude de potentialités agricoles.82

- I. Potentialités culturelles.....83
- II. Potentialités agricoles en intégrant la contrainte hydrique.....85

BILAN DU TRAVAIL - PERSPECTIVES.....89

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE



INTRODUCTION

L'environnement pédoclimatique agit sur la physiologie de la plante et le développement de la culture selon des mécanismes bien identifiés : photosynthèse liée à l'interception du rayonnement, température et photopériode réglant le développement ou encore intervention couplée sol-climat sur le déficit hydrique.

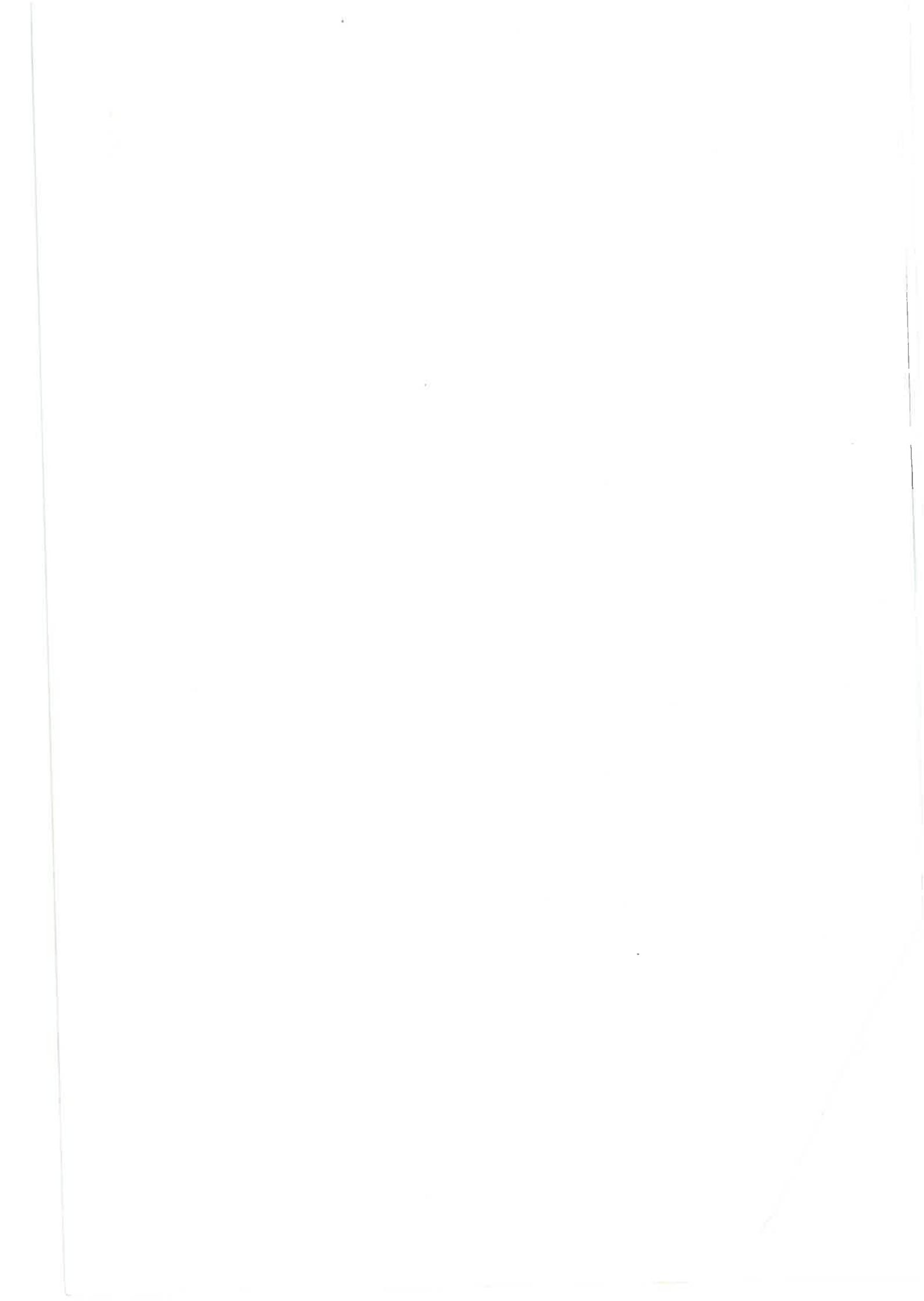
L'objet de l'agrométéorologie est de raisonner ces interactions climat-sol-culture en liaison avec la production et en évaluant, si possible, l'impact des pratiques culturales.

A ce titre, les modèles de simulation de culture, qui se sont développés récemment, apparaissent comme des outils privilégiés intégrant au sein d'un système cohérent l'ensemble des connaissances sur le fonctionnement de la culture en liaison avec les facteurs du milieu.

Dès lors qu'ils ont été validés, pour les objectifs d'utilisation qu'on leur a fixé, ces modèles peuvent jouer un rôle intéressant dans les domaines scientifique : aider à interpréter des résultats expérimentaux ou à tester des hypothèses de recherche, et technique : outils d'aide à la décision. En ce qui concerne ce dernier point, on peut espérer utiliser les modèles de simulation de culture dans deux directions : une aide à court terme, en suggérant les techniques appropriées au cours de la campagne agricole, et une aide à long terme par l'orientation des choix de spéculation liée à des études de potentialités.

Le thème des potentialités est une préoccupation ancienne des agronomes, qui a évolué avec les changements liés aux progrès techniques et génétiques. Il nous a semblé intéressant d'étudier ce qu'apporte cet outil récent qu'est le modèle de simulation de culture, à la notion de potentialités agricoles.

Nous donnerons donc quelques éléments d'introduction sur les deux thèmes essentiels de ce travail : la modélisation de culture et les potentialités.



Modèles de simulation de culture.

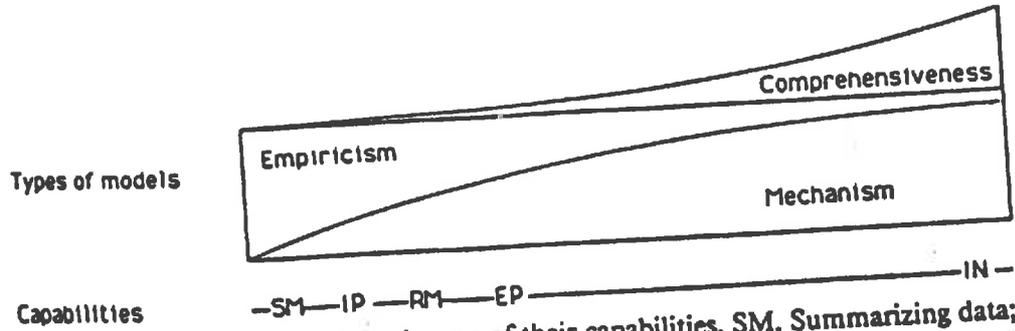
Le développement récent des modèles de simulation répond à un besoin de synthèse, aussi bien au sein de la communauté scientifique qu'au niveau du praticien. En effet, les connaissances en agriculture ne cessant de s'accroître dans toutes les directions, il en résulte une perte de vue d'ensemble et des difficultés pour gérer l'abondance des informations disponibles (DERRON, 1987).

Toutefois, nous garderons à l'esprit que les modèles ne sont que de grossières représentations du système complexe que constitue la plante et son environnement et qu'il serait prudent de supposer que l'on ne pourra jamais développer des modèles mathématiques qui imiteraient parfaitement les systèmes biologiques (HALL, 1982).

Par ailleurs, la naissance d'un modèle répond à des objectifs précis en termes de domaine d'étude, d'échelle de perception des phénomènes et de pas de temps. Ainsi, l'accent sera mis sur la plante ou sur le sol, le système fonctionnera au niveau de la cellule, de la plante ou du couvert à des pas de temps adaptés à chaque niveau, variant de l'heure à la journée et à l'ensemble du cycle cultural. Il faudra donc prendre garde à ne pas utiliser un modèle à des fins pour lesquelles il ne serait pas adapté.

Il existe divers types de modèles et plusieurs typologies pour les caractériser. On parle de modèles stochastiques ou déterministes (LOOMIS et al., 1979) pour décrire la forme des paramètres et des données d'entrées (probabiliste ou non), de modèles empiriques ou mécanistes en liaison avec les fonctions qui définissent le système, ou encore de modèles prévisionnistes ou explicatifs. En ce qui concerne les modèles de production, nous avons choisi de retenir la classification proposée par BAIER (1979), qui distingue :

- 1- les modèles statistiques de type régression multiple. Ils proposent une relation statistique, élaborée à partir d'un échantillon de points locaux, entre le rendement et une série de variables explicatives. Il s'agit, le plus souvent de modèles prévisionnistes (BROCHET et al., 1977 - GIRARDIN, 1982).
- 2- les modèles statistiques basés sur l'analyse des relations production-milieu. Un premier niveau d'analyse est réalisé mais la réponse à cette analyse est donnée sous forme statistique. Les indices de potentialité (PRIMAULT, 1969; TURC, 1972) entrent dans cette catégorie. Ces modèles font ressortir les principaux facteurs limitants du milieu sur la production.
- 3- les modèles de simulation de culture de type mécaniste. Les facteurs pédoclimatiques agissent au niveau des fonctions physiologiques qui génèrent le rendement. Ces modèles sont censés expliquer au mieux les relations liant production et milieu.



Types of crop models and some of their capabilities. SM, Summarizing data; IP, interpolative prediction (i.e., predicting behavior within the range of the data base); RM, research management (i.e., identifying gaps in our knowledge base); EP, extrapolative prediction (i.e., predicting behavior outside the range of the data base); IN, interpretation of experimental results.

figure 1 : NUANCE DANS LA TYPOLOGIE DES MODELES DE PRODUCTION
D'après Whisler et al., 1986

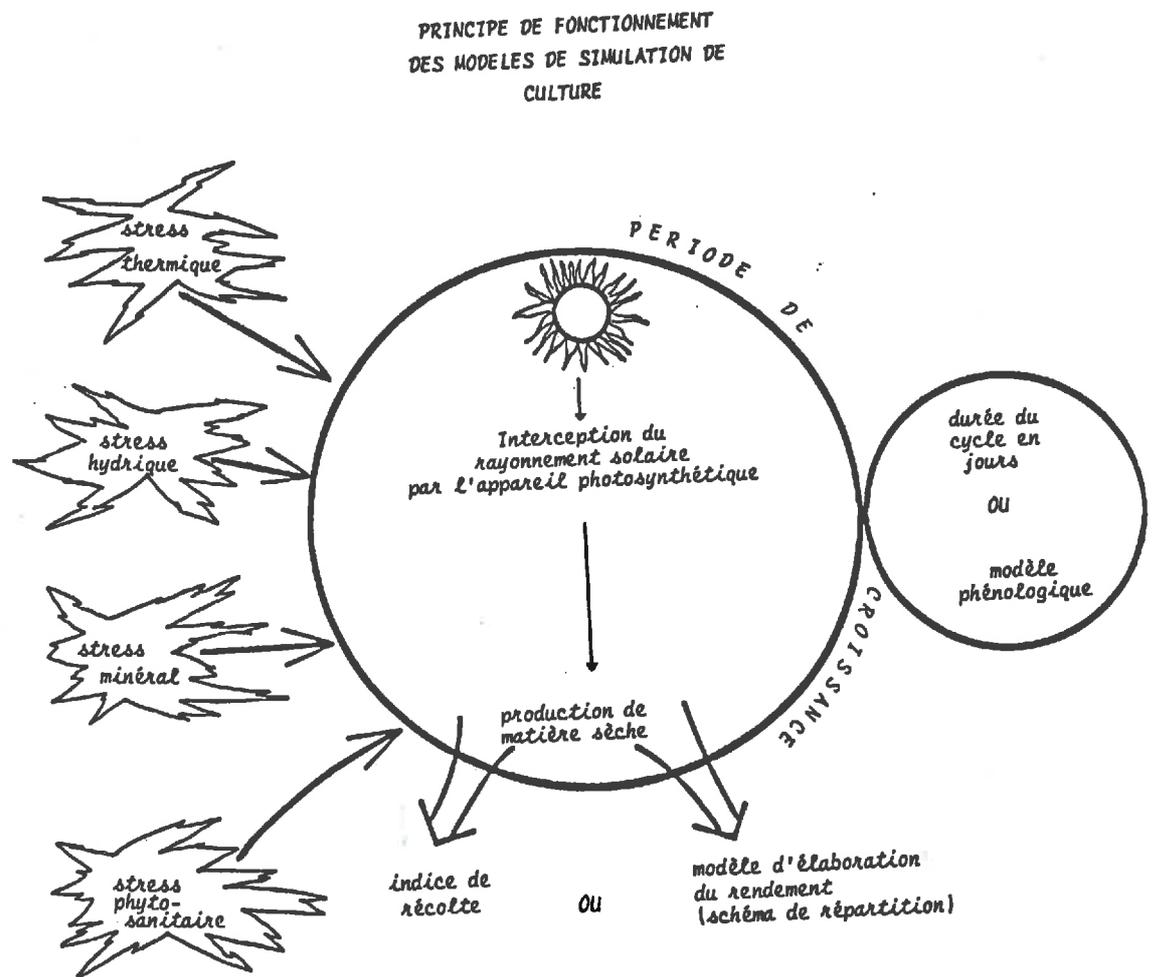


figure 2 : FONCTIONNEMENT GENERAL DES MODELES DE SIMULATION DE CULTURE

Attardons nous quelques instants sur le fonctionnement des modèles de type mécaniste.

Le système simulé est constitué par un ensemble de modules liés entre eux par des interactions régies par des lois. Ce sont ces lois qui déterminent le comportement du système. Le plus souvent elles résultent d'expérimentation et comportent donc une " dose d'empirisme " qui nous amène avec WHISLER et al. (1986) à une typologie nuancée des modèles de simulation de culture (figure 1) où " mécanisme " et " empirisme " coexistent, la compréhension du système augmentant avec son caractère mécaniste.

Rappelons, une fois encore, que le modèle ne simulera qu'une partie de la réalité et il est capital de bien identifier les limites du système : phénomènes non pris en compte, compartiment considéré comme une boîte noire et non analysé en termes mécanistes, restriction de la variation des facteurs du milieu.

Si, à présent, on s'intéresse à l'ensemble des modèles de simulation de culture développés à ce jour, qui intéressent un nombre croissant de cultures des milieux tempérés et tropicaux, (BAKER, 1980; WHISLER et al, 1986), il est possible d'extraire un schéma général de fonctionnement illustré par la figure 2.

Ces modèles se structurent autour d'un schéma de croissance : le couvert végétal intercepte le rayonnement solaire et le transforme grâce à son appareil assimilateur en matière sèche. Puis leur niveau de complexité s'accroît en même temps que le nombre de sous-modèles gravitant autour du modèle de croissance augmente.

La période de croissance peut être définie simplement par la durée du cycle en conditions optimales pendant les périodes où les facteurs climatiques, hydrique ou thermique, ne sont pas limitants (KASSAM et al.-FAO, 1979), ou être issue d'un modèle phénologique mettant en jeu température et (ou) photopériode.

Le passage de la production de matière sèche végétale au rendement peut se faire de façon purement statistique par un indice de récolte ou par une description des processus d'élaboration du rendement tenant compte de la répartition de la matière sèche dans les différents organes de la plante.

Les modèles diffèrent également par le nombre de contraintes prises en compte. Ces contraintes sont essentiellement d'ordre thermique et hydrique (WILLIAMS et al., 1984 - WILKERSON et al., 1985 - SINCLAIR, 1986) ; elles peuvent être complétées par une contrainte minérale (WILLIAMS et al., 1984; CHARPENTEAU et al., 1986) ou, mais c'est très rare, par des aspects phytosanitaires (WILKERSON et al., 1985). L'introduction de ces contraintes nécessite la mise en oeuvre de modèles parallèles : bilan hydrique, bilan minéral, attaques parasitaires.

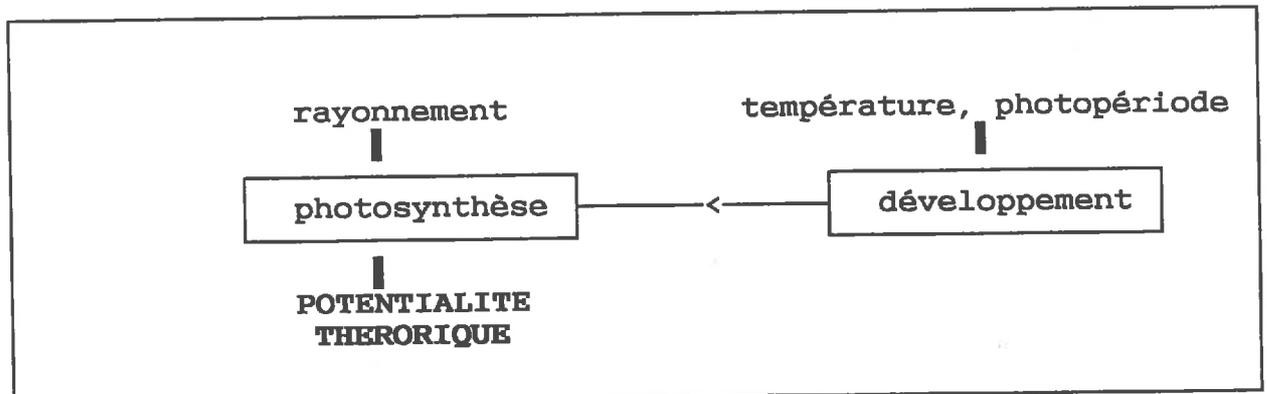
Les potentialités agricoles

BOIFFIN et SEBILLOTTE (1982) expliquent qu'autrefois les notions de fertilité du milieu ou de potentialités agricoles étaient univoques. Définies dans un cadre régional, elles renvoyaient essentiellement aux caractères intrinsèques du sol sur lequel ne " venait " qu'un nombre limité de cultures, menées avec les techniques alors disponibles. Le milieu naturel était tellement limitant qu'il occultait les autres facteurs.

Aujourd'hui, les possibilités d'artificialisation du milieu, la gamme des techniques disponibles et l'amélioration du matériel végétal ont complètement transformé les relations entre culture, technique et milieu, visant à réduire le rôle de ce dernier. Il reste toutefois que la maîtrise totale du milieu, et en particulier du climat, est encore loin d'être réalisée. Ainsi, le problème de l'adaptation d'une culture à un milieu donné est toujours d'actualité, ce qui justifie que l'on puisse s'intéresser au thème des potentialités agricoles.

Mais la notion de potentialités a perdu son caractère intrinsèque au profit d'un caractère relationnel puisque ce qui compte, à présent, ce sont les interactions existant entre les composantes de la production: milieu x culture x techniques. En conséquence, il serait abusif de parler de la potentialité du milieu; il faut plutôt se résoudre à définir plusieurs potentialités agricoles en fonction de la culture et d'une certaine hiérarchisation des contraintes exercées par le milieu.

Si la quantification du concept de potentialités agricoles a longtemps fait appel à la notion d'indice, définie par DELECOLLE (1989) comme une réduction des informations pédologiques, climatiques et biologiques, ... en une variable synthétique liée à la production, aujourd'hui, les possibilités offertes par les modèles de simulation de culture (HODGES et al., 1987 - BLANCHET et al., 1988) nous autorisent à envisager des études plus explicites répondant à l'évolution de ce concept. En effet, cette évolution nécessite une analyse du système de production qui rejoint dans ses grandes lignes celle des modélisateurs énoncés plus haut. Là encore, nous nous inspirerons du canevas d'analyse proposé par BOIFFIN et SEBILLOTTE (1982) et illustré par la figure 3, qui met bien en évidence le double rôle joué par le milieu pédoclimatique: **moteur** pour la croissance et le développement de la culture, il exerce parallèlement un certain nombre de **contraintes** : hydrique (excès ou déficit), thermique (gel), nutritives (carences ou toxicités d'éléments minéraux).



POTENTIALITE CULTURALE

P
O
T
E
N
T
I
A
L
I
T
E
S

A
G
R
I
C
O
L
E
S

- | | | |
|--|---|--------------------------|
| contrainte thermique
gel, avortement, échaudage | x | lutte anti-gel
serres |
|--|---|--------------------------|

- | | | |
|------------------|---|------------|
| déficit hydrique | x | irrigation |
|------------------|---|------------|

- | | | |
|---------------------|---|---------------|
| carence alimentaire | x | fertilisation |
|---------------------|---|---------------|

- | | | |
|--------------------------|---|-------------------------|
| attaques
parasitaires | x | lutte
phytosanitaire |
|--------------------------|---|-------------------------|

- | | | |
|------------------|---|------------|
| mauvaises herbes | x | désherbage |
|------------------|---|------------|

- | | | |
|-------------|---|----------|
| excès d'eau | x | drainage |
|-------------|---|----------|

- | | | |
|-----------------------------------|---|-------------------|
| contrainte de structure
du sol | x | travail du
sol |
|-----------------------------------|---|-------------------|

figure 3 : ANALYSE DES POTENTIALITES - HIERARCHISATION DES CONTRAINTES APPLIQUEE AU CAS DU SOJA DANS LE SUD DE LA FRANCE

Une première étape nous amène à définir une potentialité photosynthétique ou théorique puis, la prise en compte de la durée du cycle cultural conduit à une potentialité culturale qui correspond à ce que serait la production si aucune contrainte n'intervenait. Il semble que ces deux niveaux de potentialités n'aient aucune réalité expérimentale car, comme on le verra par la suite, il existe au moins la contrainte thermique qui, indépendamment de son rôle phénologique, est omniprésente dans le fonctionnement physiologique de la plante. En revanche, ces valeurs sont accessibles par simulation, ce qui constitue un des intérêts des modèles de production de type mécaniste.

La prise en compte d'une ou plusieurs contraintes aboutit à la notion de potentialités agricoles (figure 3). Compte tenu du développement des techniques culturales, il ne suffit plus d'étudier simplement la contrainte exercée par le milieu, il faut analyser le couple:

contrainte x technique visant à
réduire la contrainte.

Si la contrainte s'exprime comme une réduction de la potentialité culturale (valeur comprise entre 0 et 1), le facteur "technique" fera en sorte d'annuler la contrainte en ramenant le produit contrainte x technique proche de 1. L'idéal serait d'évaluer le facteur "technique" en fonction de la faisabilité autorisée par le milieu, ce qui n'est pas indépendant des problèmes économiques.

Donc, dans une première approche on peut évaluer la potentialité agricole comme le produit :

$$PA = PC \times \pi(\text{contrainte} \times \text{technique})$$

La spécificité du milieu liée à celle de la culture nous permet de hiérarchiser les contraintes et d'affiner la définition des potentialités agricoles en même temps que de nouveaux facteurs limitants sont intégrés. Nous proposons un schéma (figure 3) adapté au cas du Soja dans le sud de la France. Il souligne la fragilité des cultures de printemps vis à vis du froid en début de cycle et leur sensibilité à la sécheresse. S'agissant d'une Légumineuse, la contrainte liée à l'alimentation azotée occupe une place annexe.

L'étape finale de cette démarche, que nous n'aborderons pas dans le cadre de notre travail, concerne l'intégration des contraintes économiques: coût des techniques, risques financiers liés au choix du système de culture...

Il reste un point essentiel à éclaircir relatif à la variable que l'on affecte aux potentialités agricoles. Si le rendement est le plus souvent évoqué, car c'est un révélateur du déroulement de l'ensemble du cycle qui, de plus, se situe au carrefour des préoccupations techniques et économiques de l'agriculteur, ce n'est pas toujours lui qui va motiver le choix d'une spéculation. En effet, l'aptitude aux semis précoces, la résistance à la sécheresse, la longueur du cycle sont autant de facteurs décisifs pour l'agriculteur, qu'il est important de prendre en compte dans une étude de potentialités.

Ainsi les potentialités agricoles appellent une connaissance globale du fonctionnement culture-milieu d'autant plus approfondie que le nombre de contraintes à intégrer sera important.

Cette constatation suffirait à justifier notre préférence pour les modèles de simulation de culture par rapport aux modèles statistiques. Mais il existe un autre obstacle à l'utilisation de ces derniers qui est inhérent à leur mode de construction et qui a définitivement orienté notre choix. En effet, les modèles statistiques reposent sur un échantillonnage de données qui intègrent une certaine variabilité de la production en termes de milieu, de temps, de techniques culturales, que l'on ne peut décomposer. Pour des raisons analogues, il est imprudent d'utiliser ces modèles à des échelles qui ne coïncident pas avec l'échelle de l'échantillon de base, car des contraintes peuvent apparaître ou disparaître sans que le modèle puisse les intégrer. Donc, quoique très utiles pour réaliser des prévisions (DAGNELIE et al., 1983), ces modèles ne répondent pas à la définition analytique des potentialités que nous nous sommes fixée.

QUELQUES MOTS SUR LE SOJA

La graine de soja, riche en protéines (40%) et en huile (20%), constitue une matière première de base pour l'alimentation animale. Et ce qui concerne l'alimentation humaine, la teneur élevée du soja en protéines intéresse de plus en plus les spécialistes de la diététique et l'on voit apparaître, sur les marchés occidentaux, des aliments à base de soja, loin de leur berceau asiatique d'origine.

*"En remerciant de l'avoir abrité et nourri alors qu'il était blessé, le dieu des singes offrit à l'empereur de combler son vœu le plus cher. "Je voudrais, dit celui-ci, que la famine soit toujours épargnée à mon peuple."
Et le dieu lui fit don d'une graine de soja."*

Légende chinoise

Malgré ses atouts majeurs, la culture du soja ne s'est réellement développée en France et en Europe qu'à partir des années 1973-74 (embargo des Etats-Unis sur les livraisons de soja vers l'Europe). La mise en culture a démarré dans le sud-ouest de la France "quelque part entre Agen et Carcassonne" alors que parallèlement se mettaient en place des programmes de recherche sur soja. A partir des années 80, l'organisation des professionnels, les progrès génétiques et la maîtrise des techniques culturales aidant, la culture du soja a commencé à gagner des régions plus froides, à climat plus continental.

SUPERFICIES (HA)	1980	1985	1987	1988
SUD-OUEST	7 100	23 600	51 700	52 800
SUD-EST	300	3 000	14 300	26 200
CENTRE-EST	-	800	10 200	21 700
CENTRE-OUEST	100	600	1 600	4 500
NORD	-	100	1 100	2 300

Au plan agronomique, parmi les atouts de la culture du soja, on peut citer sa robustesse vis à vis des risques parasitaires graves, ses coûts de production assez faibles, ses avantages au niveau de la rotation (rupture de la monoculture du maïs, bonne structuration superficielle du sol), les possibilités d'intensification par l'irrigation.

Résumé fait à partir des bulletins trimestriels INOCULUM de l'ONID de BLANCHET, 1986 et de PUECH, 1986.

Présentation du travail

Nous proposons donc un travail, avant tout méthodologique, visant à répondre à la question suivante :

Les modèles de simulation de culture sont-ils des outils suffisamment fiables et, en même temps, suffisamment souples d'utilisation pour étudier les questions d'ordre agrométéorologique et, en particulier les potentialités agricoles d'un milieu pédoclimatique ?

Nous avons été amené à choisir une culture, puis un modèle de simulation. Le soja nous est apparu comme un exemple intéressant (voir encadré ci-contre), compte tenu de l'extension récente des surfaces cultivées en Europe (en France : 90 000 ha en 1988, 130 000 ha prévus pour 1989, en Italie : 400 000 ha localisés dans la plaine du Pô), qui soulève des problèmes de maîtrise culturale et d'adaptation pour cette plante originaire de régions plus chaudes, à jours plus courts.

L'importance de cette culture outre-atlantique (Etats-Unis, Brésil) a conduit une équipe de chercheurs américains à élaborer un modèle de soja, SOYGRO, qui a servi de base à notre travail. SOYGRO se situe dans la gamme des modèles mécanistes qui s'efforcent de réduire les recours aux lois empiriques. On constate, de plus, un équilibre satisfaisant entre la description des phénomènes physiologiques de la plante intégrés à l'échelle du couvert, et les aspects sol.

Une compréhension correcte du système étant nécessaire à la suite de notre travail, nous avons analysé en détail les divers modules de SOYGRO et leurs interactions. Cela nous a conduit à réaliser une adaptation variétale du modèle et surtout à élaborer un compartiment "fonctionnement hydrique" original. Comme dans toute démarche de modélisation, tests de sensibilité et validations nous permettent d'établir les repères indispensables entre la simulation et la réalité du fonctionnement de la culture. A partir de ce travail et en guise de conclusion, nous proposons des pistes de travail pour une étude de potentialités agricoles.

1ère PARTIE

MODELISATION DE LA PHYSIOLOGIE DE LA PLANTE INTEGREE A L'ECHELLE DU COUVERT

Cette partie, orientée sur les aspects physiologiques, est constituée de deux chapitres. Le premier traite du fonctionnement du modèle SOYGRO et le second est focalisé sur les aspects variétaux qui débouche sur une adaptation du modèle aux variétés cultivées dans nos régions.

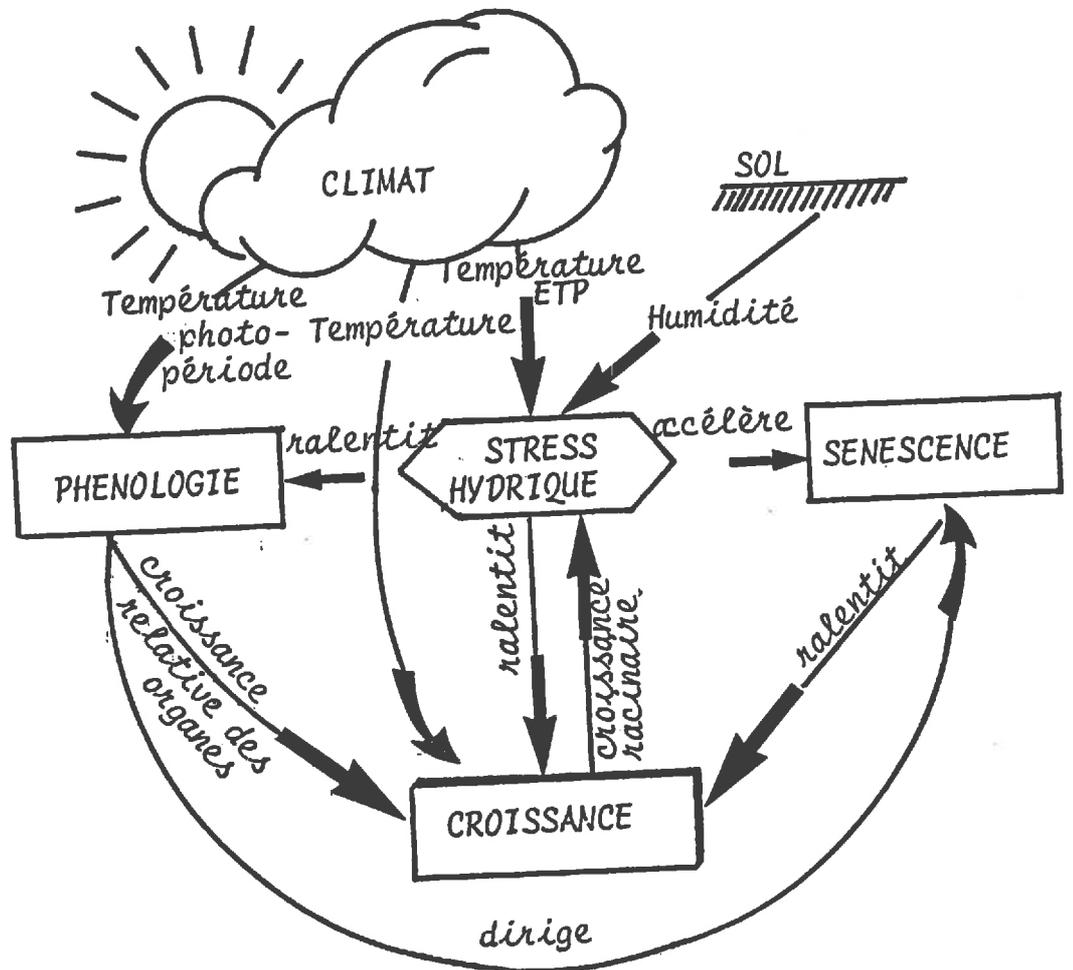


figure 4 : INTERACTIONS ENTRE LES DIFFERENTS MODULES ET L'ENVIRONNEMENT PEDOCLIMATIQUE

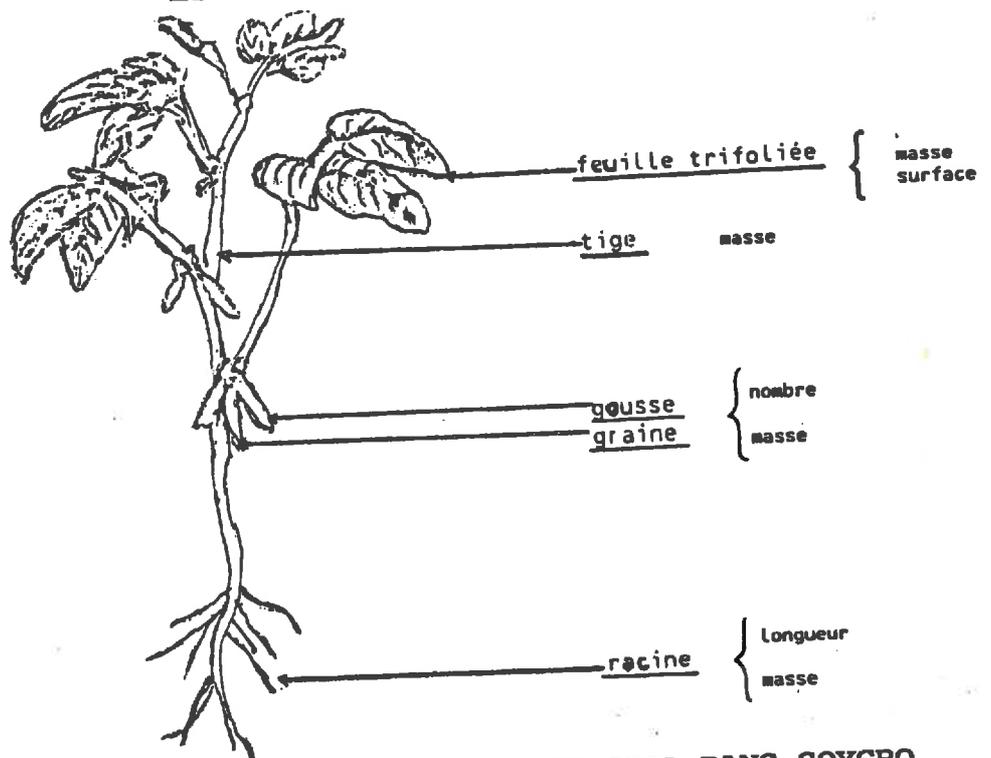


figure 5 : LA PLANTE DE SOJA DANS SOYGRO

A. FONCTIONNEMENT DU MODELE SOYGRO

Préambule

SOYGRO est un modèle de simulation de la culture du soja, élaboré par une équipe américaine de l'Université de Gainesville - Etat de Floride - (WILKERSON et al., 1983 - WILKERSON et al., 1985). Cette équipe, actuellement dirigée par JONES, continue à travailler sur SOYGRO en vue d'améliorer l'adéquation du modèle avec la réalité physiologique et agronomique de la culture du soja, tout en optimisant et en amplifiant son utilisation.

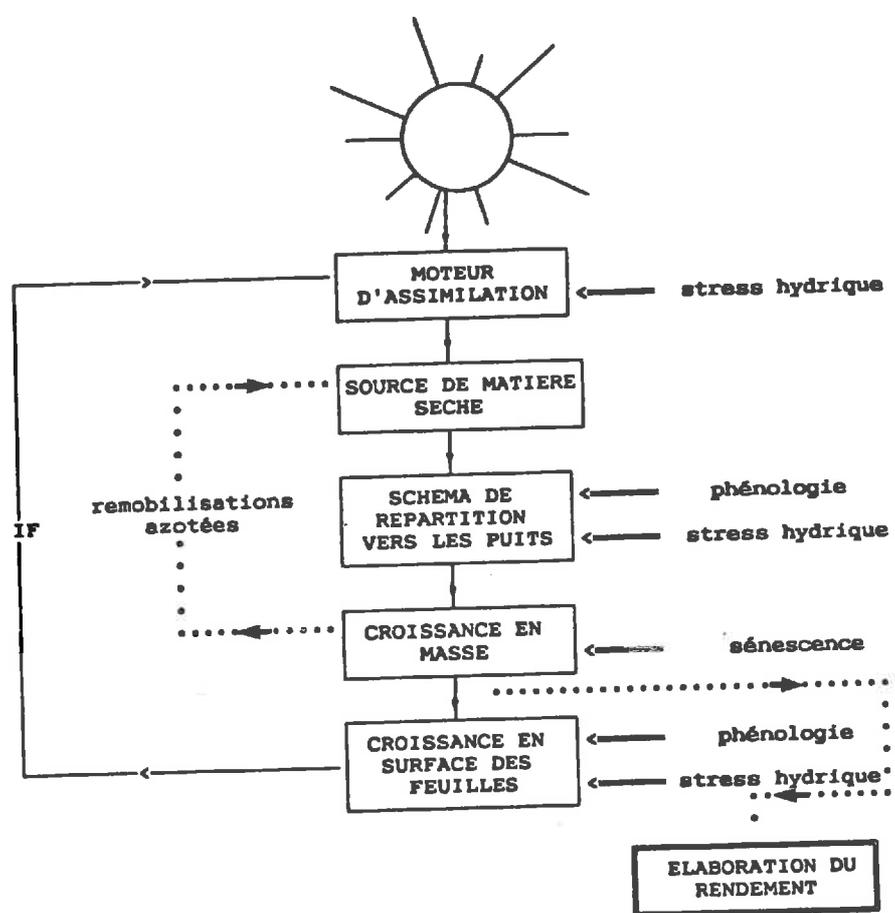
Le travail présenté ici concerne la version 5.0 du modèle, qui m'a été transmise par la station INRA-Bioclimatologie d'Avignon. Comme aucune présentation détaillée du modèle n'existait, une première phase du travail a consisté à dépouiller le document informatique de SOYGRO, afin de comprendre l'ensemble des éléments de fonctionnement du système et, éventuellement, d'en déceler les faiblesses.

Au delà de SOYGRO, l'objet de ce chapitre est de décrire en détail les mécanismes et les règles de fonctionnement de ce type de modèle.

SOYGRO se compose de modules qui interagissent, comme le montre la figure 4. Ces modules sont en fait les moteurs de phénomènes physiologiques bien connus : croissance, développement, sénescence, stress hydrique. Le modèle fonctionne au pas de temps journalier.

Par rapport au schéma général, illustré par la figure 2, SOYGRO ne comporte pas les modules de stress alimentaire et phytosanitaire. En revanche, le stress thermique est bien intégré dans le système mais, compte-tenu de ses divers modes d'action selon la fonction physiologique affectée, il n'est pas traité comme un module indépendant. Il est incorporé dans les autres modules

Notons que de façon directe ou indirecte, l'environnement pédoclimatique intervient dans chacun des modules.



(...): pendant la phase de remplissage du grain.

figure 6: SCHEMA DU FONCTIONNEMENT DU MODULE CROISSANCE DE SOYGRO EN LIAISON AVEC LES AUTRES MODULES

TECHNIQUES CULTURALES	-variété -date de semis -densité, écartement -irrigations
CLIMAT	J par O U R -températures minimales et maximales -rayonnement global -précipitations
SOL (Ritchie)	C O par U C H E -humidité à la limite inférieure d'extraction d'eau -humidité à la limite de drainage -humidité à saturation -fonction de densité de longueur racinaire -limite d'évaporation potentielle du sol nu (création du mulch) -albédo du sol nu -constante de drainage -coefficient de ruissellement

tableau 1 : DONNEES D'ENTREE DU MODELE SOYGRO

I . LES DIFFERENTS MODULES DE SOYGRO ET LEURS INTERACTIONS

La plante est modélisée comme une structure composée d'organes qui jouent un rôle soit de source, soit de puits vis à vis du flux d'assimilats (figure 5). La partie végétative est constituée des feuilles, tiges et racines et la partie reproductrice comprend uniquement les cosses et les graines (gousse = cosse + graines). Nous verrons par la suite que les fleurs sont considérées comme un "potentiel" de gousses. Le modèle ignore également les nodosités racinaires, particularités des Légumineuses dont fait partie le soja, qui jouent pourtant un double rôle : de source vis à vis des composés azotés et de puits vis à vis des photosynthétats.

Le module de croissance (figure 6) constitue la trame du modèle sur laquelle les autres modules (phénologie, sénescence, stress hydrique) vont interférer. Schématiquement, il y a production d'assimilats qui sont ensuite répartis dans les divers organes de la plante (feuilles, tiges, racines, gousses et graines), ou puits, et permettent une croissance en masse. Pour le feuillage, la croissance en masse est convertie en croissance en surface, afin de décrire l'évolution de l'indice foliaire (LAI). Quand le remplissage des graines commence, la remobilisation des composés azotés, depuis les parties végétatives vers les graines, constitue une source nouvelle de matière sèche pour l'appareil reproducteur. Ce processus joue un rôle important dans la mise en place du rendement qui correspond au poids sec final des graines.

La phénologie régit essentiellement le schéma de répartition des assimilats, elle donne le départ pour les remobilisations azotées, participe à la croissance en surface des feuilles et intervient dans le module de sénescence.

Le module de stress hydrique intervient sur tous les autres par le biais de deux fonctions (SWFAC et TURFAC) qui prennent en compte l'existence d'un gradient de sensibilité des fonctions physiologiques à cette contrainte : quand il y a stress hydrique, un certain nombre de fonctions vitales, décrites dans le modèle, sont ralenties (développement, photosynthèse, croissance en surface des feuilles, accélération de la sénescence) ou modifiées (répartition des assimilats en faveur des racines). Compte-tenu de l'importance de ce module, une étude détaillée lui sera consacrée par la suite. Nous ne verrons dans ce chapitre que son mode d'interaction avec les autres modules.

Il faut noter que SOYGRO ne comporte pas de module minéral, c'est-à-dire que l'on suppose que l'alimentation minérale, en général, et azotée en particulier est à son optimum.

Les données d'entrée du modèle (tableau 1) concernent les techniques culturales, le climat et le sol. Ce dernier intervient uniquement dans le module de stress hydrique ; c'est pourquoi les données d'entrée du sol sont liées à la dynamique de circulation de l'eau, dans et à la surface du sol. Les abréviations utilisées pour décrire paramètres et variables du modèle sont regroupées dans une liste donnée en annexe 10.

Stage of development descriptions for soybeans. For describing a community of plants, the stage designated should represent the average of plants studied. The stage descriptions apply to single plants directly. Development on the main stem only is considered and branches are ignored.

Vegetative stages		Reproductive stages	
Stage no.	Description	Stage no.	Description
V1	Completely unrolled leaf at the unifoliate node.	R1	One flower at any node.
V2	Completely unrolled leaf at the first node above the unifoliate node.	R2	Flower at node immediately below the uppermost node with a completely unrolled leaf.
V3	Three nodes on main stem beginning with the unifoliate node.	R3	Pod 0.5 cm (1/4 inch) long at one of the four uppermost nodes with a completely unrolled leaf.
V(N)	N nodes on the main stem beginning with the unifoliate node.	R4	Pod 2 cm (3/4 inch) long at one of the four uppermost nodes with a completely unrolled leaf.
		R5	Beans beginning to develop (can be felt when the pod is squeezed) at the four uppermost nodes with a completely unrolled leaf.
		R6	Pod containing full size green beans at one of the four uppermost nodes with a completely unrolled leaf.
		R7	Pods yellowing; 50% of leaves yellow. Physiological maturity.
		R8	95% of pods brown. Harvest maturity.

tableau 2 : DOUBLE ECHELLE PHENOLOGIQUE PROPOSEE PAR FEHR ET AL. (1971)

STADES VEGETATIFS	STADES REPRODUCTEURS
1 VE : levée	
2 V ₁ : premier noeud	
.	
.	
V _i : i ^{ème} noeud	
.	
.	
8 ENDLEAF : fin de la croissance végétative	3 JPEND : fin de la phase juvénile
	4 E ₀ : induction florale
	5 R ₁ : début floraison
	6 PODSTART : début formation gousses (R ₃)
	7 R ₄ : gousses
	9 ENDSET : fin mise en place des organes reproducteurs
	10 R ₇ : maturité physiologique
	11 R ₈ : maturité de récolte

tableau 3 : ECHELLE PHENOLOGIQUE DE SOYGRO
 Les stades numérotés sont les stades repères de SOYGRO. Les stades non numérotés (stades V_i avec i > 1) sont calculés systématiquement jusqu'à la fin de croissance végétative (ENDLEAF).

(d'après WILKERSON et al., 1985)

II . LE MODULE DE PHENOLOGIE

1. L'échelle des stades phénologiques

On distingue les variétés à croissance déterminée pour lesquelles développement végétatif et reproducteur se succèdent sans se chevaucher, et les variétés à croissance indéterminée pour lesquelles il y a chevauchement. Pour ces dernières, des fruits se forment alors qu'apparaissent encore de nouveaux noeuds.

En France, on cultive essentiellement des variétés indéterminées. Néanmoins, de nouvelles variétés déterminées ou semi-déterminées, à fort potentiel de production, tendent à apparaître (travaux de VIDAL, INRA-Montpellier).

Pour rendre compte de cette réalité FEHR et al. (1971) proposent une double échelle phénologique : l'échelle des stades végétatifs (ou V) et l'échelle des stades reproducteurs (ou R). Ces échelles sont indépendantes, nous en donnons une description détaillée et illustrée en annexe 1.

L'échelle phénologique de SOYGRO (tableau 3) diffère de celle de FEHR, par la prise en compte d'une période d'induction florale, ainsi que la fin de la croissance végétative et la fin de la floraison. Pour les variétés à croissance déterminée les stades PODSTART, R4 et ENDLEAF sont confondus. Le schéma 7 illustre le chevauchement des différentes phases de développement et permet de situer l'échelle de SOYGRO dans le cadre plus classique de FEHR.

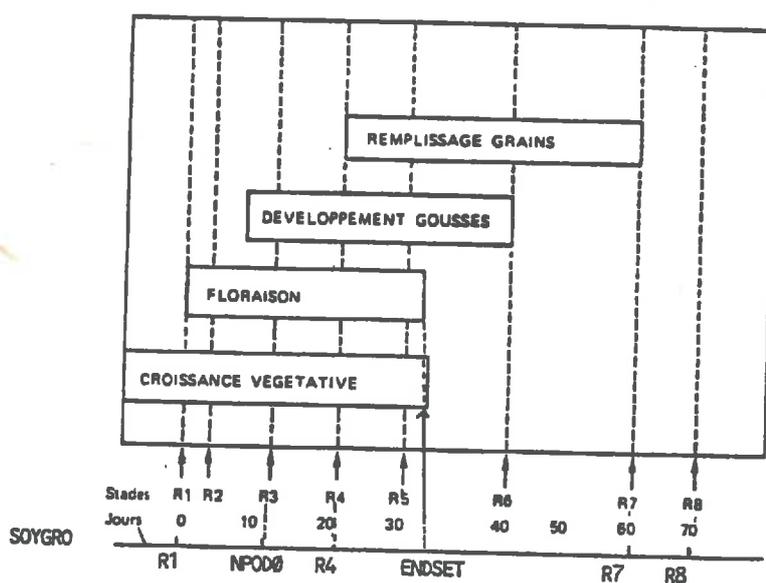


figure 7 : chevauchement des phases phénologiques

pour un soja à croissance indéterminée (Puech et Bouniols, 1986)



2. Déterminisme du développement chez le soja

Le soja, comme de nombreuses espèces, est à la fois sensible à la température et à la photopériode (GENEVOIS, 1942; JUDITH et al., 1977).

La photopériode joue un rôle très important et constitue, sous certaines latitudes un facteur limitant à la culture du soja (BORTHWICK et PARKER, 1938; JOHNSON et al., 1960; POLSON, 1972; BOARD et al., 1984; ECOCHARD, 1986).

En effet, le soja est une plante de jours courts : au-delà d'un seuil de durée du jour, l'induction florale est fortement retardée (ou ne se fait pas) de même que la maturation. Toutefois, la durée du jour au-delà de laquelle l'initiation florale ne se fait plus, varie selon les variétés (BYTH, 1968; CRISWEL et HUME, 1972; MAJOR, 1980; WANG et al., 1987).

La sensibilité de la plante à la photopériode commence à la fin de la phase juvénile (stade JPEND dans SOYGRO), elle est particulièrement importante pendant la période d'induction florale (SHAMUGASUNDARAM, 1978). SEDDIGH (1984), explique que ce sont les températures nocturnes et donc le temps pendant lequel elles agissent (d'où photopériode) qui gouvernent en grande partie le développement du soja pendant les phases dites photosensibles.

Dans les régions septentrionales, les variétés cultivées sont peu exigeantes en jours courts mais la quantité de chaleur disponible étant faible, elles sont également moins exigeantes en chaleur. Selon ECOCHARD (1978), les variétés les plus précoces sont souvent les plus indifférentes à la longueur du jour.

On classe ainsi les variétés cultivées en groupes de précocité qui tiennent compte de la latitude et des conditions thermiques (ECOCHARD, 1986). Par exemple, en Amérique du Nord, on rencontre dix groupes de précocité : 00, 0, I, II, ..., VIII. Il existe des groupes plus tropicaux IX et X et plus septentrionaux 000. Les groupes de précocités cultivés en France sont :

Brie, Beauce	000,00
Bourgogne, Ain	00
Poitou, Charente	0, I
Aquitaine Midi-Pyrénées	I, II
Languedoc, Basse Vallée du Rhône	II

SOYGRO a été validé d'après des données d'essais réalisés avec des groupes de précocité III (var. Wayne), VII (var. Bragg) et VIII (var. Cobb), dans le sud des Etats Unis. Il s'agit donc de variétés tardives par rapport à celles cultivées en France.

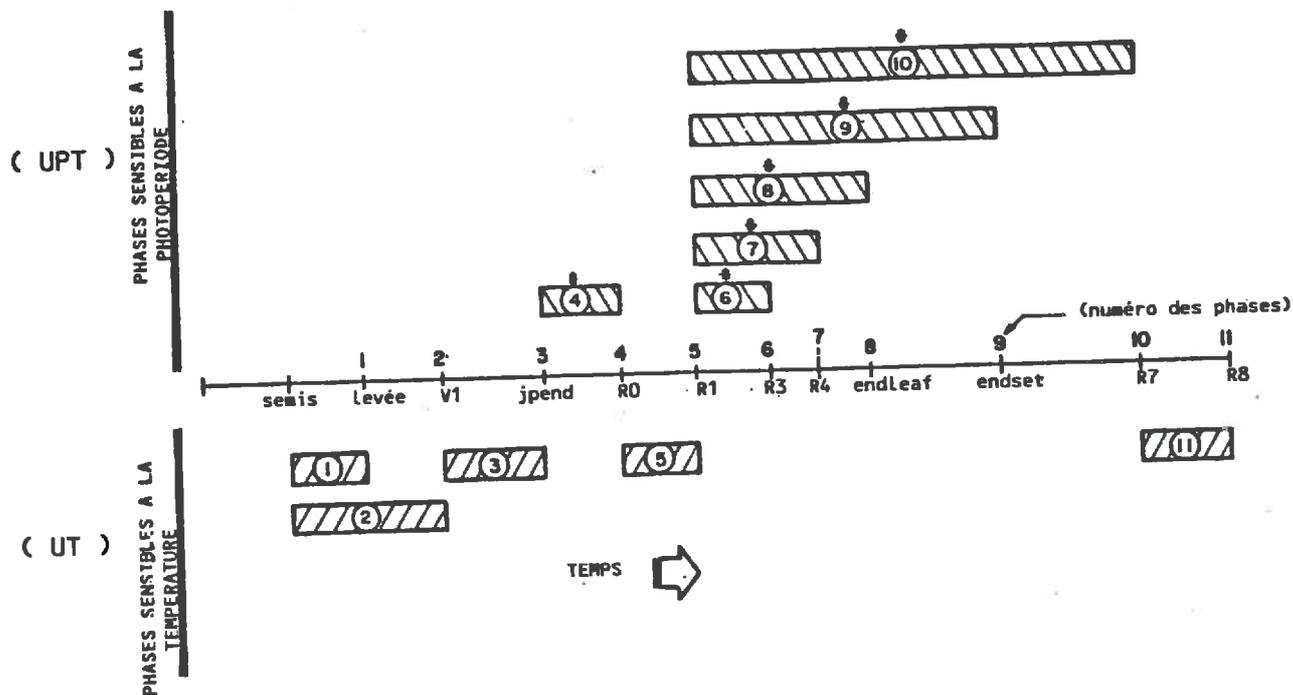


figure 8 : SENSIBILITE DES PHASES PHENOLOGIQUES
(tirée de WILKERSON et al., 1985)

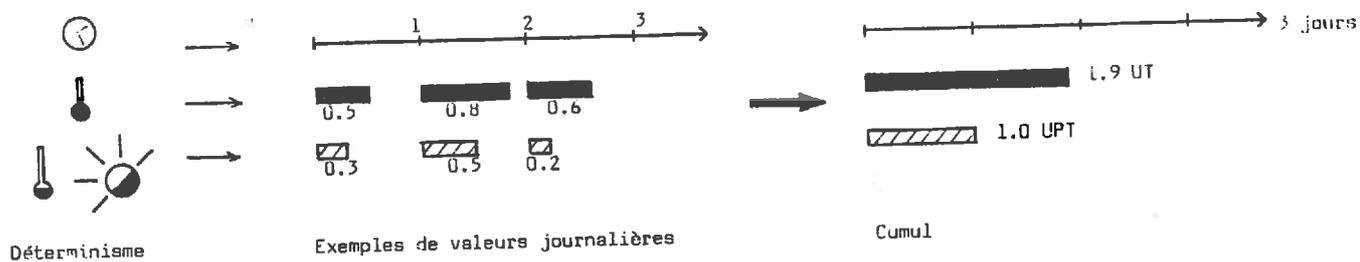


Figure 9 : Les trois "temps" de SOYGR0

- temps horaire
- temps thermique, $D_v(j)$ en UT
- ▨ temps photothermique, $R(j)$ en UPT

3. Modélisation du développement

Compte-tenu de l'importance de la photopériode, MAJOR et al. (1975 a) montrent les limites des modèles de développement uniquement thermiques et proposent un modèle qui tient compte à la fois de la température et de la photopériode (MAJOR et al., 1975 b). D'autres modèles ont été proposés par la suite (HODGES et FRENCH, 1985).

Dans SOYGRO, le calcul des phases phénologiques repose sur la définition de deux "temps" physiologiques (figure 8) : le temps thermique (exprimé en unités arbitraires UT) sert à modéliser le déroulement végétatif du cycle et le temps photothermique (exprimé en unités arbitraires UPT) intervient dans le calcul des stades reproducteurs qui sont sous la double dépendance de la température et de la photopériode. Ainsi, comme le montre la figure 9, trois "horloges" différentes fonctionnent simultanément et, à une journée correspondront des durées thermiques et photothermiques variables selon les conditions de milieu.

Le temps thermique

La fonction thermique journalière, $Dv(j)$, est égale à une somme de températures horaires pondérées par des températures seuil (7°C au minimum, 30°C à l'optimum et 45°C au maximum).

$$Dv(j) = \left[\sum_{h=1}^{24} FT(h) \right] / 24, \text{ exprimée en UT}$$

et $FT(h)$ est définie par une fonction très simple (figure 10 au verso). Les températures horaires sont reconstituées à partir des températures extrêmes journalières et des heures de lever et de coucher du soleil selon deux modèles successifs : sinusoïdal pendant la période diurne et linéaire pendant la période nocturne (figure 11 au verso). On notera qu'il existe d'autres modèles, plus faciles à utiliser, tels celui de Hallaire (1950) qui introduit une fonction linéaire des températures extrêmes et un coefficient horaire variable avec la latitude.

Cette fonction permet, en particulier, de définir un index plastochronique, IP, correspondant à la durée "thermique" nécessaire à l'émergence d'un noeud sur la tige principale. Ainsi, la progression journalière des stades végétatifs s'écrit :

$$Dv(j) \times \text{TRIFOL} \times \text{TURFAC}$$

où TRIFOL = $1/IP$, c'est un paramètre variétal et TURFAC un facteur de réduction dû au stress hydrique.

Pour des modèles simplifiés, SINCLAIR (1984) montre comment décrire l'évolution de l'indice foliaire à partir d'un index plastochronique.

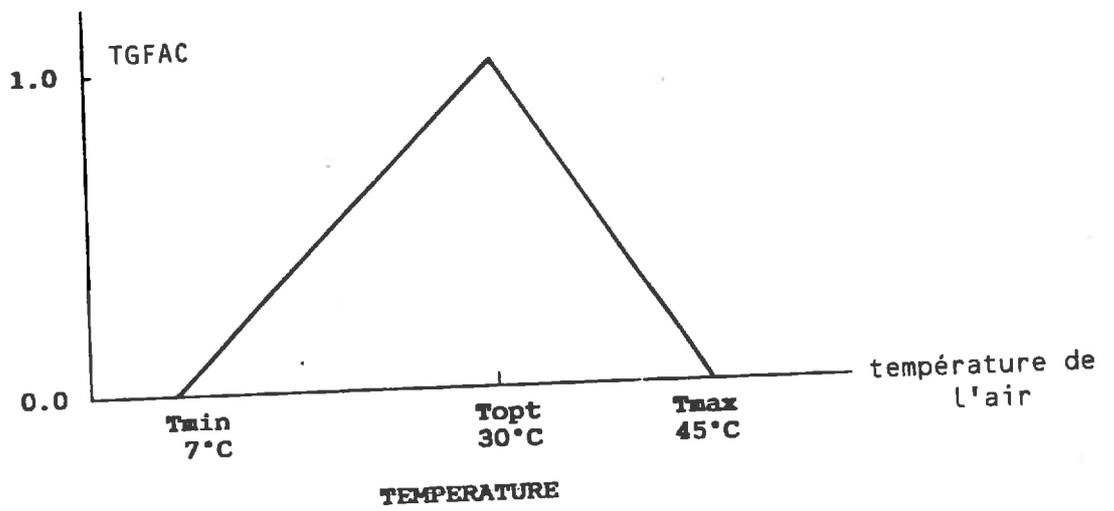


figure 10 : CALCUL DU FACTEUR THERMIQUE HORAIRE
(tirée de WILKERSON et al., 1985)

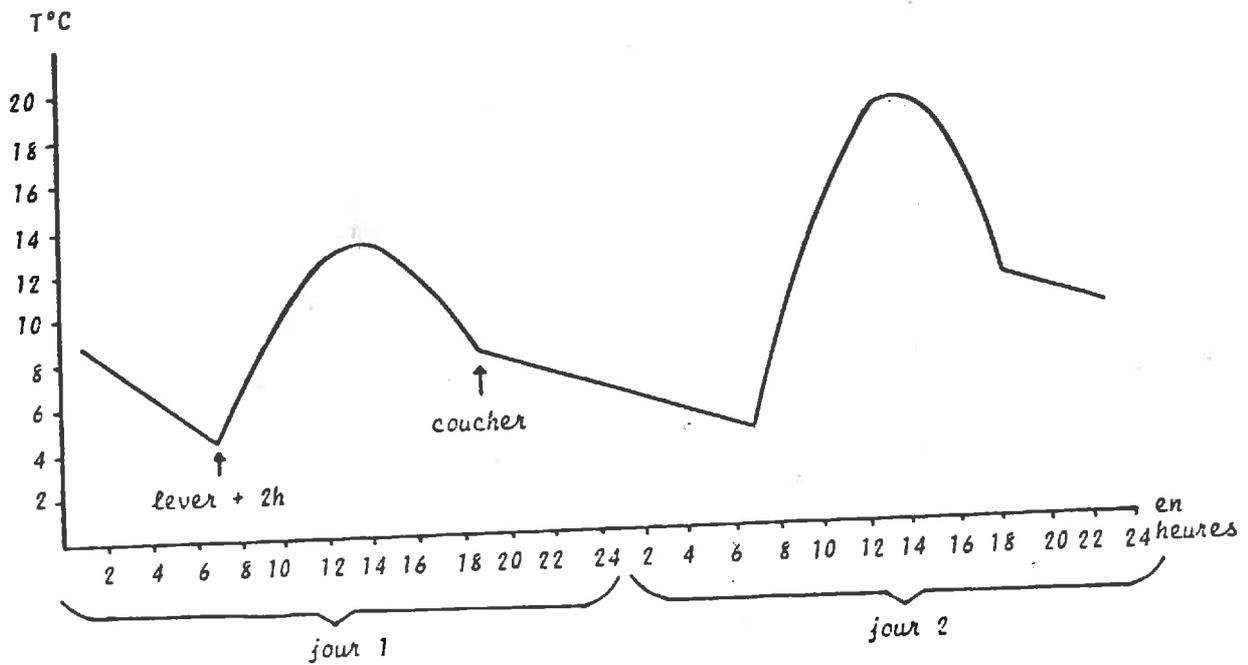


figure 11: RECONSTITUTION DES TEMPERATURES HORAIRES
A PARTIR DES EXTREMES JOURNALIERS
(d'après Listing SOYGR0)

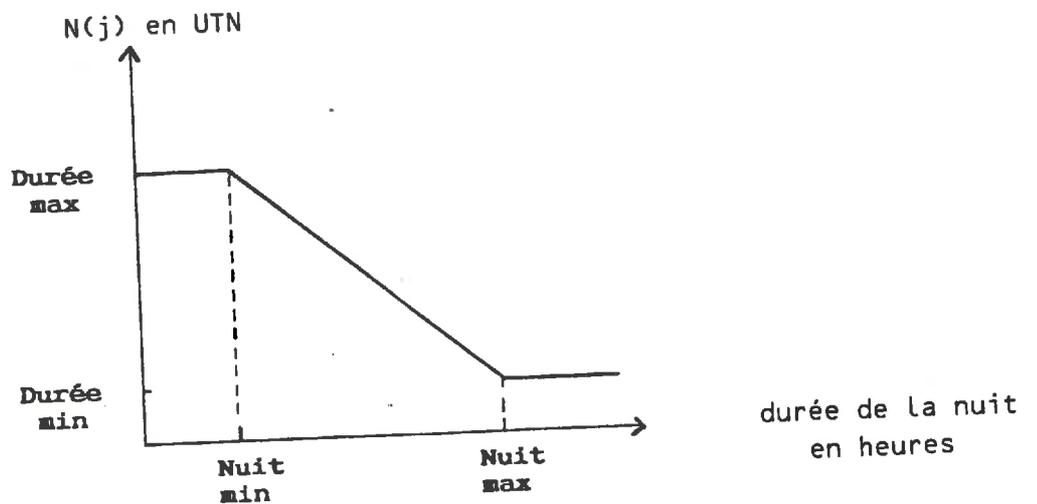


figure 12: sensibilité à la photopériode
(tirée de WILKERSON et al., 1985)

Les phases calculées avec la fonction thermique sont, pour la plupart, indépendantes de la variété :

phases	durées (en UT)	
- semis-levée (VE).....	6.5	
- semis-V1.....	10.9	indépendants
- V1-JPEND.....	2.4	de la variété
- R ₀ -R ₁	9.5	
- R ₇ -R ₈	10.0	(var. WAYNE)
- phases V.....	2.4	(var. WAYNE)

Par ailleurs, une somme de températures plus classique intervient dans le calcul de la progression du front racinaire, dont la fonction journalière s'écrit :

$$\text{Drac}(j) = \text{Dv}(j) \times (\text{TOPT} - \text{TMIN})$$

Drac(j) a la dimension : UT x degré, mais l'UT étant une unité arbitraire sans dimension propre, Drac(j) peut être assimilée à une température.

Le temps photothermique

La fonction photothermique journalière, R(j), prend en compte température et durée de la nuit sous la forme de deux fonctions :

$$R(j) = \text{Dr}(j) / N(j), \text{ exprimée en UPT}$$

Dr(j) est une somme de températures "nocturnes" :

$$\text{Dr}(j) = \left[\sum_{h=\text{dn}}^{\text{fn}} \text{FT}(h) \right] / \text{durnuit}, \text{ exprimée en UTN}$$

où fn = heure de début de nuit
 dn = heure de fin de nuit
 durnuit = durée de la nuit

N(j) correspond à la durée de l'induction florale, exprimée comme Dr(j) en UTN, et définie en fonction de la durée de la nuit selon la courbe représentée sur la figure 12. Cette courbe est caractérisée par des paramètres variétaux parmi lesquels deux sont particulièrement importants : le seuil de photopériode à partir duquel la floraison commence à être retardée (Nuit max) et la pente de la droite qui détermine l'intensité de la sensibilité de la variété vis à vis de la photopériode (Durée max). Comme le montrent les figures 13 (au verso), une variété précoce sera caractérisée par un seuil, Nuit max, faible et parallèlement une faible sensibilité (Durée max).

Ainsi, quelle que soit la variété le temps nécessaire à l'induction florale (JPEND-R₀) correspond à 1 UPT (Dr = N). La définition du temps photothermique dépend donc de la variété, de même que toutes les phases de développement qui lui sont liées :

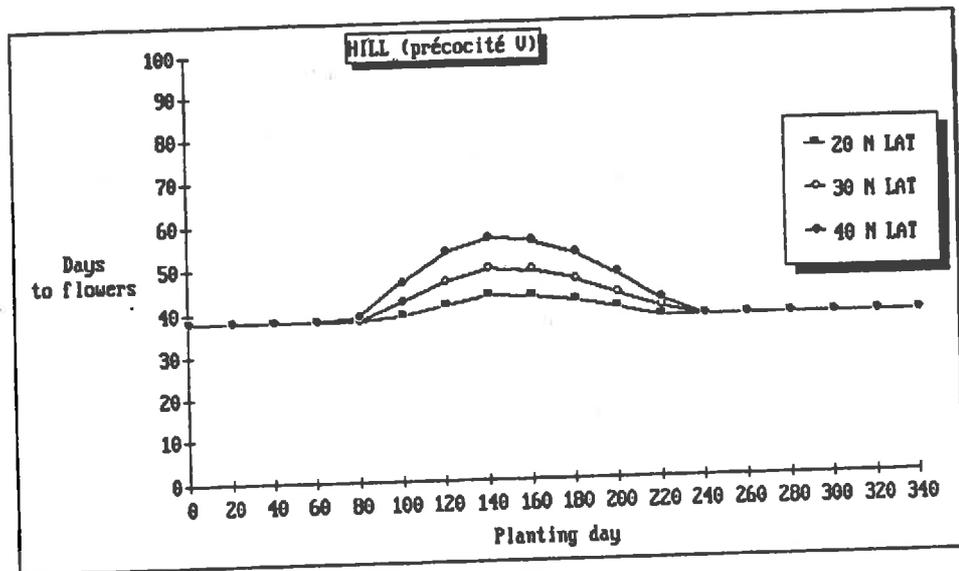
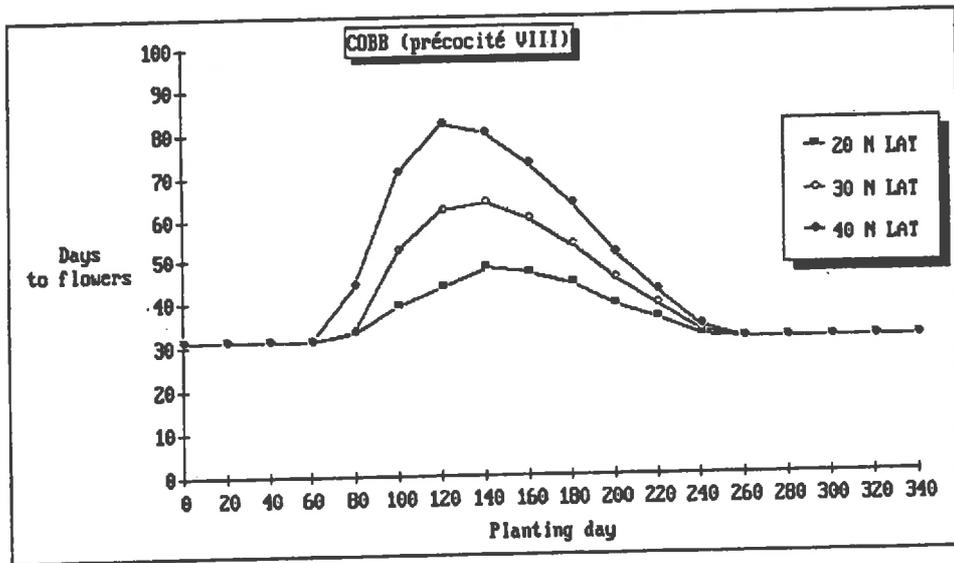


fig 13 : Sensibilité à la photopériode en fonction de la variété, de la latitude et de la date de semis.

(d'après JONES et al., 1987)

phase	durées (en UPT)	
	indéterminée (Wayne)	déterminée (Bragg)
JPEND-R ₀	1	1
R ₁ -PODSTART	20% R ₁ -R ₇	15% R ₁ -R ₇
R ₁ -R ₄	41% R ₁ -R ₇	15% R ₁ -R ₇
R ₁ -ENDLEAF	50% R ₁ -R ₇	15% R ₁ -R ₇
R ₁ -ENDSET	60% R ₁ -R ₇	57% R ₁ -R ₇
R ₁ -R ₇	14.5	20.3

Entre les stades R₁ et R₄ la fonction journalière R(j) peut être réduite par le facteur de stress hydrique TURFAC, ce qui implique un allongement du cycle reproducteur.

Commentaires

On peut s'étonner de la simplicité de la courbe de réponse du développement à la température (figure 10), sachant que l'approximation linéaire de la courbe réelle telle que l'a décrite DURAND (1967) est fortement liée à la gamme des températures rencontrées et donc au site (DELECOLLE et GUERIF, 1986). Et, selon les mêmes auteurs, les seuils de températures définissant la courbe peuvent varier selon la phase considérée. Ainsi, chez le soja, HESKETH et al. (1973) montrent que les effets de la température sur le développement reproducteur et sur le développement végétatif sont différents : il semblerait que l'optimum se situe entre 22 et 28°C pour le premier et entre 28 et 35°C pour le second. C'est pourquoi JONES et al. (1988 a) proposent, dans la dernière version de SOYGRO, deux courbes FT différentes pour calculer Dv(j) et Dr(j).

4. Rôle de la phénologie dans le modèle

Ce rôle sera précisé par la suite lors de la description des phénomènes concernés. On peut, toutefois, retenir les stades importants :

PHENOMENES	STADES
Répartition des assimilats	VE, V2, V4 V5, ENDFEAF, PODSTART, ENDSET, R7, R8
Croissance en surface des feuilles	V1, V2, V3; V4, V5, R1, ENDFEAF, stade intermédiaire épaissement
Sénescence	V3, V5, V10, V14, ENDSET, R7

Les stades JPEND et R₀ servent uniquement à calculer le stade R₁

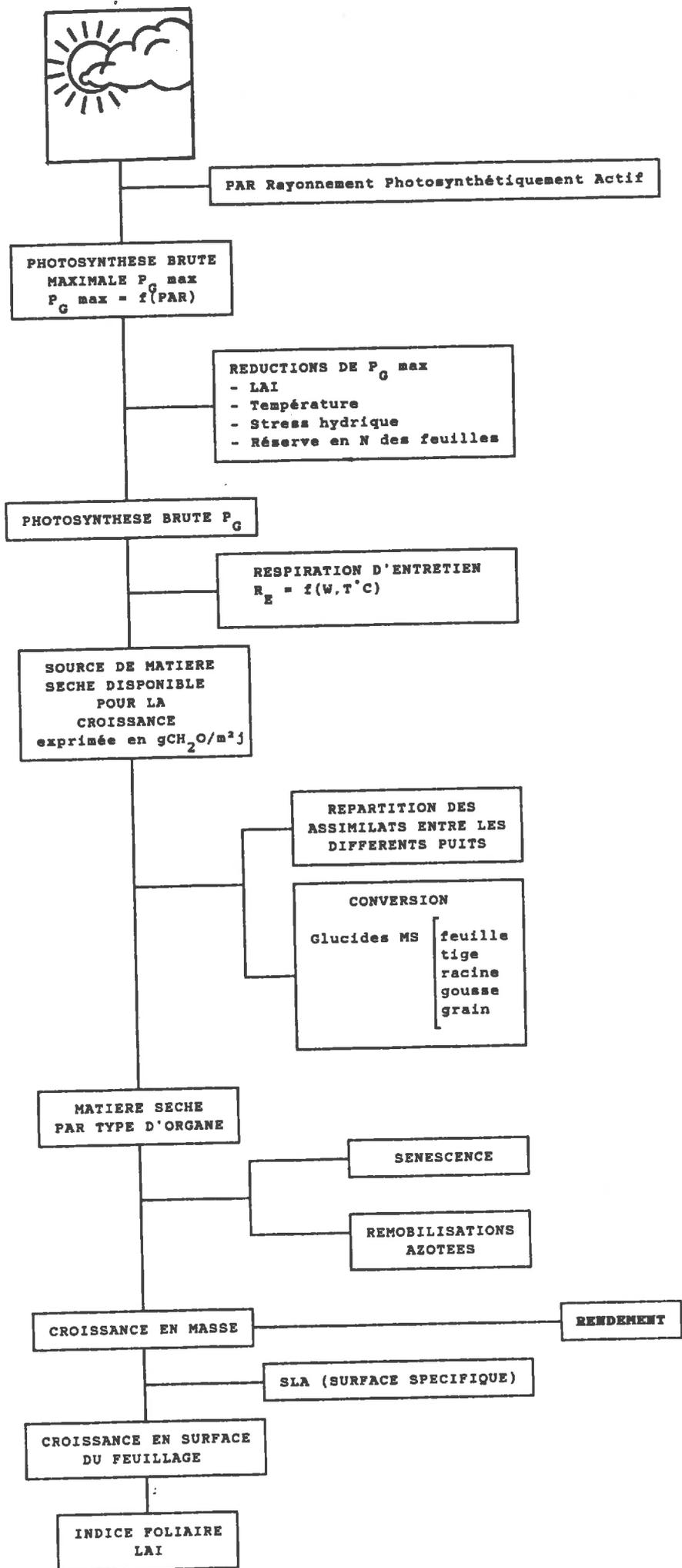


Figure 14 Le Module de Croissance

III. LE MODULE DE CROISSANCE : LA TRAME DU MODELE.

La figure 14 montre la décomposition de ce module en plusieurs parties successives :

- l'assimilation
- la répartition des assimilats
- leur conversion en divers composés biochimiques
- la croissance en masse
- la croissance en surface du feuillage.

Ces fonctions sont liées les unes aux autres par un mécanisme d'adéquation source-puits (offre-demande).

1. Le moteur d'assimilation

Il s'agit des fonctions de photosynthèse puis de respiration, qui alimentent la source de matières sèches glucidiques. La première étape consiste à calculer la photosynthèse brute (P_G) en fonction du rayonnement intercepté et d'un certain nombre de facteurs limitants.

. La photosynthèse brute maximale (P_G max)

La photosynthèse brute maximale est fonction de l'énergie lumineuse reçue par la plante ou plus exactement du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) selon la formule suivante :

$$P_G \text{ max} = 1.67 \text{ PAR} - 0.0173 \text{ PAR}^2$$

avec P_G max en g CH_2O /jour et PAR en Einstein/m²/jour
(1 Einstein = 1 molé de photons).

Le PAR correspond à l'énergie radiative d'une fraction du spectre et par conséquent, varie théoriquement selon la proportion de rayonnement direct et diffus (Mc CREE, 1981). En pratique, nous n'avons pu réaliser cette distinction et avons assimilé le PAR à la moitié du rayonnement global incident (GOUDRIAAN, 1982).

La forme de la courbe proposée (figure 15.a, verso de la page 18) est assez classique (KASSAM et al., FAO-1979). Elle met en évidence le palier de saturation photosynthétique du soja, mais intègre un certain nombre d'approximations sur la réponse effective de cette plante à la lumière : distribution géométrique des feuilles, hauteur du soleil ... qu'une approche plus analytique de ce phénomène doit intégrer (GOUDRIAAN, 1982)

Par ailleurs, les phénomènes de photorespiration (respiration à la lumière qui caractérise les plantes en C3) sont implicitement pris en compte dans l'expression de la photosynthèse brute.

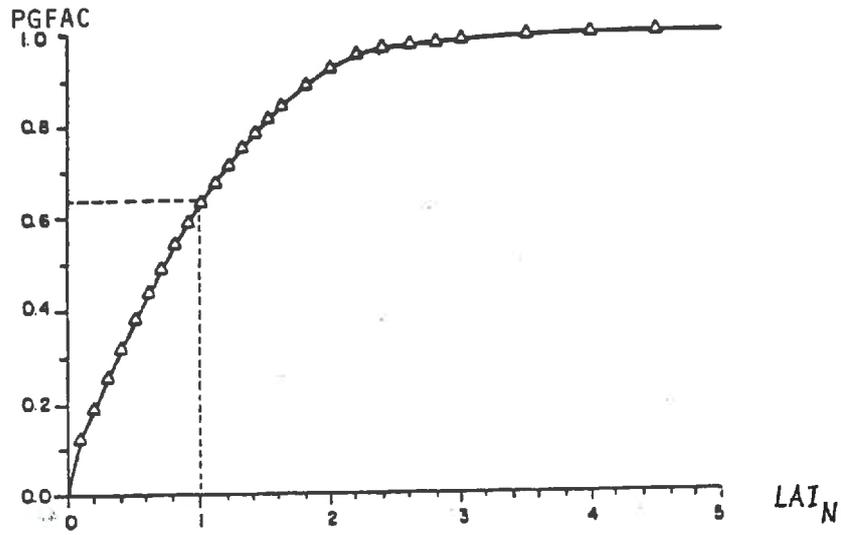


figure 16.a: PGFAC fonction de LAI_N
 (tirée de WILKERSON et al., 1985)

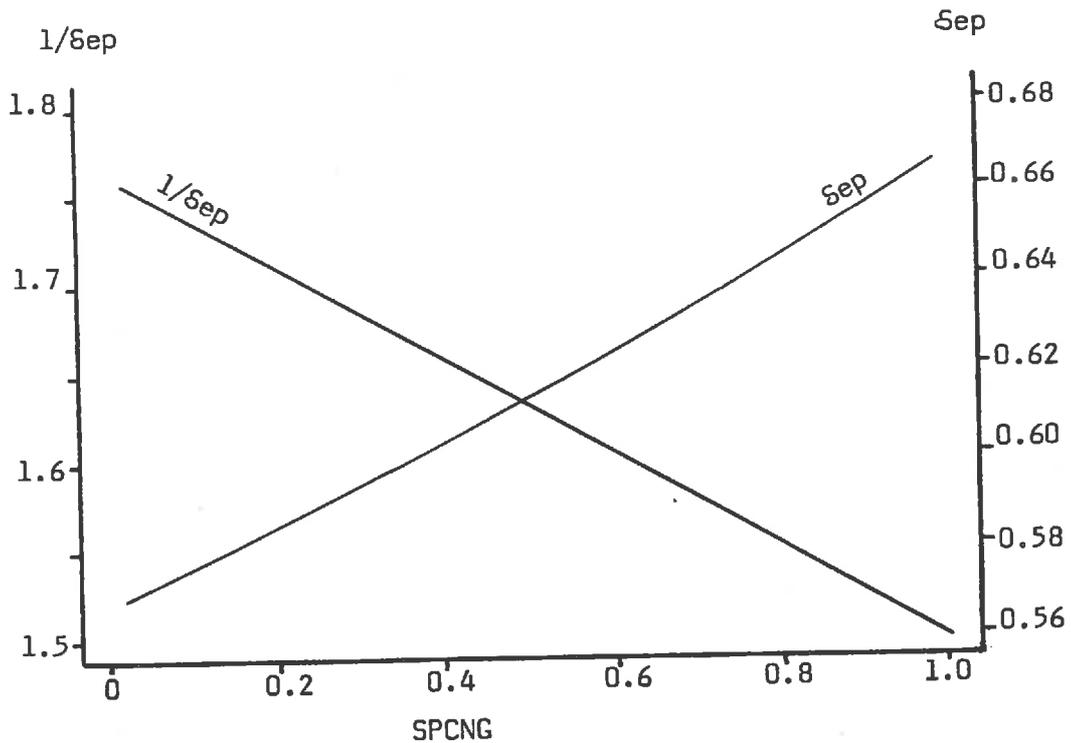


Figure 16b: Coefficient d'extinction en fonction de la régularité de l'espacement des plantes

Cette photosynthèse potentielle peut être réduite par une couverture du sol (indice foliaire) ou une teneur azotée des feuilles non optimales ou, par des stress thermique ou hydrique.

. Réduction de la photosynthèse brute maximale par l'indice foliaire (PGFAC)

Cette réduction correspond au pourcentage du rayonnement intercepté par le feuillage par rapport au rayonnement incident, décrit par MONTEITH (1981) selon le formalisme suivant :

$$PGFAC = PGFAC_{\infty} (1 - \exp^{-\delta_{ep} \times LAI})$$

où $PGFAC_{\infty}$ = valeur asymptotique de PGFAC pour des indices foliaires tendant vers l'infini
et δ_{ep} = coefficient d'extinction qui, théoriquement, varie avec le port du feuillage, la hauteur du soleil, les propriétés optiques des feuilles et l'organisation spatiale du couvert (BARET et al., 1989).

Ce formalisme est repris par les auteurs de SOYGRO (figure 16.a) en posant $PGFAC_{\infty} = 1$ (la valeur moyenne donnée par BARET et al., 1989, est de 0.94) et $LAI_N = \delta_{ep} \times LAI$.
Ainsi quand $LAI_N = 1$, $PGFAC = 1 - \exp(-1) = 0.63$.

Le coefficient d'extinction, δ_{ep} , varie avec l'espèce. Selon CHARTIER (1966), il est compris entre 0.3 et 0.5 pour des graminées et entre 0.5 et 0.1 pour des feuilles à port plus horizontal. Pour le soja, SAKAMOTO et SHAW (1967) et LEMEURE (1973) donnent des valeurs variant entre 0.45 et 0.55 pour des couverts à structure en rang très marquée.

Dans SOYGRO, δ_{ep} est calculé en fonction de la régularité de l'espacement entre les plants (SPCNG) définie par :

$$SPCNG = \text{distance inter-plant} / \text{distance inter-rang}$$

C'est en fait $1/\delta_{ep}$ qui est introduit dans le modèle comme une fonction linéaire de SPCNG (figure 16.b). On remarquera que le coefficient d'extinction, ainsi calculé, est relativement élevé par rapport aux valeurs de la bibliographie.

Ainsi, la courbe de réponse de la photosynthèse au rayonnement incident varie-t-elle en fonction de la régularité de l'espacement des plantes, ce qu'illustre la figure 15.b (verso page 18).

. Réduction de la photosynthèse par les remobilisations azotées (AGEFAC)

Une partie importante du pool protéique des feuilles correspond à la Rubisco, enzyme assurant la fixation photosynthétique, qui est l'une des premières molécules remobilisées (LATCHE et al., 1986). Par conséquent les remobilisations azotées pénalisent l'appareil assimilateur.

Dans SOYGRO, la réduction de photosynthèse due à ce phénomène est exprimée en fonction du taux moyen d'azote dans une feuille (NF%, voir paragraphe remobilisations azotées pour le calcul), considérant que ce qui se passe à l'échelle du couvert est assimilable à ce qui se passe à l'échelle de la feuille (BOOTE et al., 1978).

$$\text{AGEFAC} = -1.599 + 1.132 \text{ NF}\% - 0.123 (\text{NF}\%)^2$$

figure 15.c (au verso)

Cette réduction, s'ajoutant à la diminution de l'indice foliaire, fait en sorte que, pendant le remplissage des grains, les capacités photosynthétiques du couvert diminuent. Cela correspond globalement aux observations de CALMES et al. (1987). Dans les modèles de GODWIN et VLEK (1985) ou encore dans celui de VAN KEULEN et SELIGMAN (1987), ce facteur azoté existe mais intervient en réduction de l'indice foliaire.

. Réduction de la photosynthèse par le stress hydrique (SWFAC)

Le stress hydrique provoque la fermeture des stomates, ce qui réduit considérablement les échanges et donc affecte la photosynthèse. Ce phénomène est pris en compte par le facteur SWFAC, calculé dans le module stress hydrique.

. Réduction de la photosynthèse par la température (TPHFAC)

La photosynthèse décroît linéairement quand la température du jour est en dessous de 24°C ou au-dessus de 34°C. L'allure de la courbe (15.d) est assez classique, on la retrouve dans le modèle blé de Van KEULEN et SELIGMAN (1986) avec une translation vers des températures nettement inférieures.

Cependant, on notera que l'ajustement a été réalisé avec des températures moyennes dépassant 15°C, ce qui a pour conséquence de simuler un arrêt de la fonction assimilatrice pour des températures moyennes en deçà de 5°C. Or cette limite semble quelque peu élevée pour des variétés des groupes 0 et 00 (PLANCHON, com. pers.). Par ailleurs, selon BERRY et BJORMAN (1980), interviendraient des phénomènes d'acclimatation de la plante à la température. La courbe proposée est donc une grossière approximation de la réalité.

figure 15.a
PGmax fonction de PAR

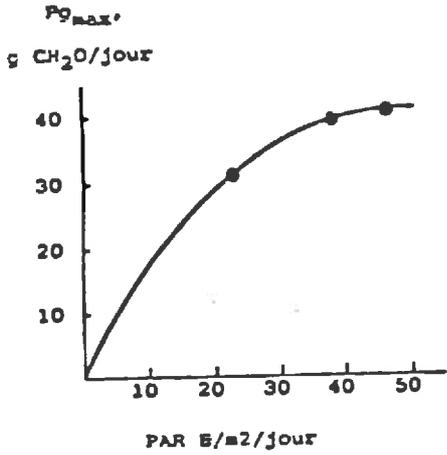


figure 15.b
REDUCTION DE PGMAX PAR LE LAI

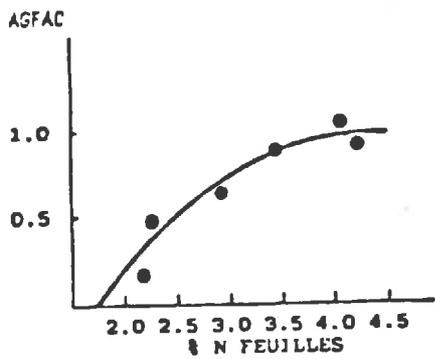
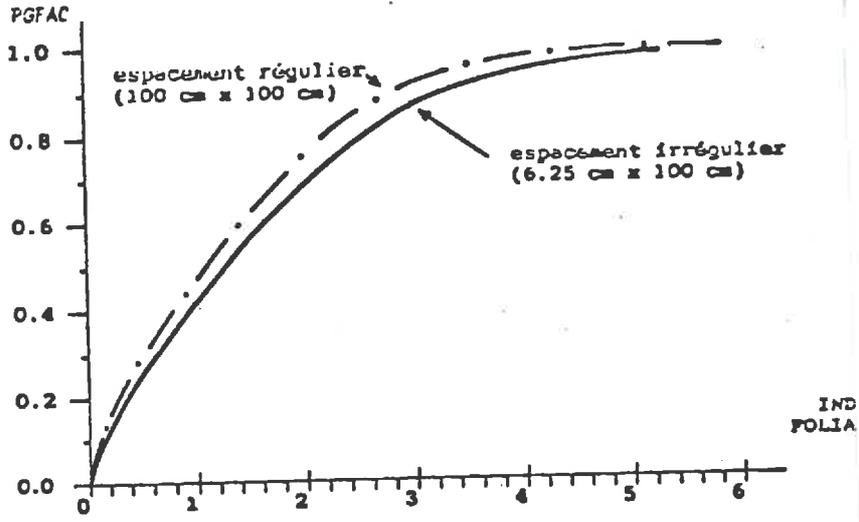


figure 15.c
REDUCTION DE PGMAX PAR N%

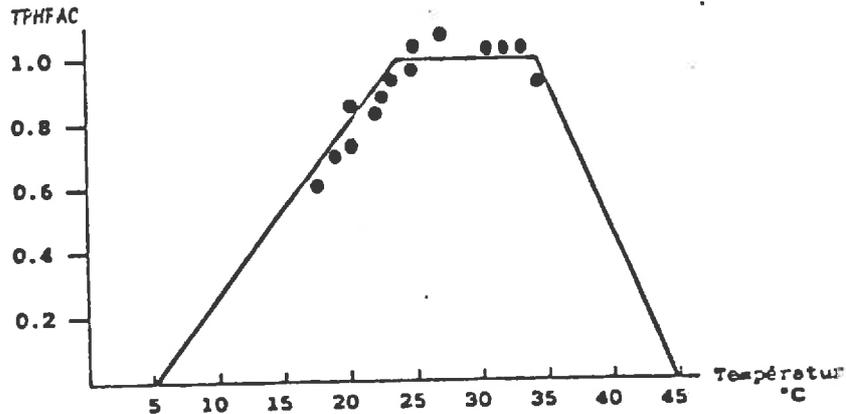


figure 15.d
REDUCTION DE PGMAX PAR LA TEMPERATURE

figures tirées de WILKERSON et al., 1985

. Photosynthèse brute (PG)

La photosynthèse brute, résultant de l'ensemble de ces réductions s'exprime simplement :

$$PG = PG_{max} \times PGFAC \times AGEFAC \times SWFAC \times TPHFAC$$

Indice Foliaire	Azote Foliaire	Stress Hydrique	Stress Thermique

R E D U C T I O N S

Les facteurs de réductions sont sans unités et varient entre 0 et 1. PG s'exprime en g CH₂O/m²/jour.

. Remarques sur les réductions de la photosynthèse

Dans SOYGRO, l'augmentation du potentiel photosynthétique ne dépend que de l'interception du rayonnement, c'est-à-dire du rayonnement incident et de l'indice foliaire. Les autres facteurs agissent en réducteurs. Or des auteurs font mention de la possibilité de stimulation de la photosynthèse par la présence des graines au moment du remplissage des gousses (LATCHE et al., 1986; SHIBLES, 1989). L'origine de ce phénomène serait hormonal.

. la respiration d'entretien

La seconde étape consiste à évaluer la quantité d'assimilats réellement disponibles pour la croissance (PGVAL), en diminuant la photosynthèse brute de la respiration d'entretien (R_E):

$$PGVAL = PG - R_E \quad \text{en g CH}_2\text{O/jour}$$

La respiration se décompose en une respiration d'entretien (R_E), et une respiration de croissance (R_C). La respiration d'entretien correspond aux processus qui permettent le maintien des structures cellulaires et leurs gradients ioniques (PENNING de VRIES, 1975), tandis que la respiration de croissance correspond aux processus liés à la conversion biochimique du substrat en composés organiques propres aux différents organes de la plante (PENNING de VRIES, 1974). Selon Mc CREE (1970), la respiration d'entretien s'exprime en fonction de la quantité globale de matière sèche de la plante, alors que la respiration de croissance est liée à la photosynthèse nette.

Ici, nous ne nous intéresserons donc qu'à la respiration d'entretien, l'évaluation de la respiration de croissance sera abordée au paragraphe "conversion". En accord avec PENNING de VRIES (1982), les auteurs de SOYGRO considèrent que pour une partie des composantes des organes de stockage, la respiration d'entretien est très faible et par conséquent ils la négligent. Par ailleurs, ils introduisent un terme correctif à la respiration de base (R_B) pour tenir compte du fait que les protéines enzymatiques des feuilles, ayant un turn-over rapide, nécessite une respiration d'entretien plus élevée (R_P). Cela tient au fait que dans la plante certains tissus sont plus actifs que d'autres (protéines enzymatiques des feuilles comparées aux protéines de stockage des graines). Ainsi on aboutit à la formule suivante :

$$R_E = R_B + R_P$$

Calcul de R_B :

$$R_0 = C_{30} \times F(T) \times W_E$$

où

C_{30} = coefficient d'entretien à 30°C, soit $40 \cdot 10^{-4}$ g CH₂O/g MS

$F(T)$ = effet température

W_E = masse de matière à entretenir ne prenant en compte qu'une partie des graines (équivalente au poids des cosses)

Calcul de R_P :

$$R_P = R_{Op} \times F(T) \times P_G$$

où

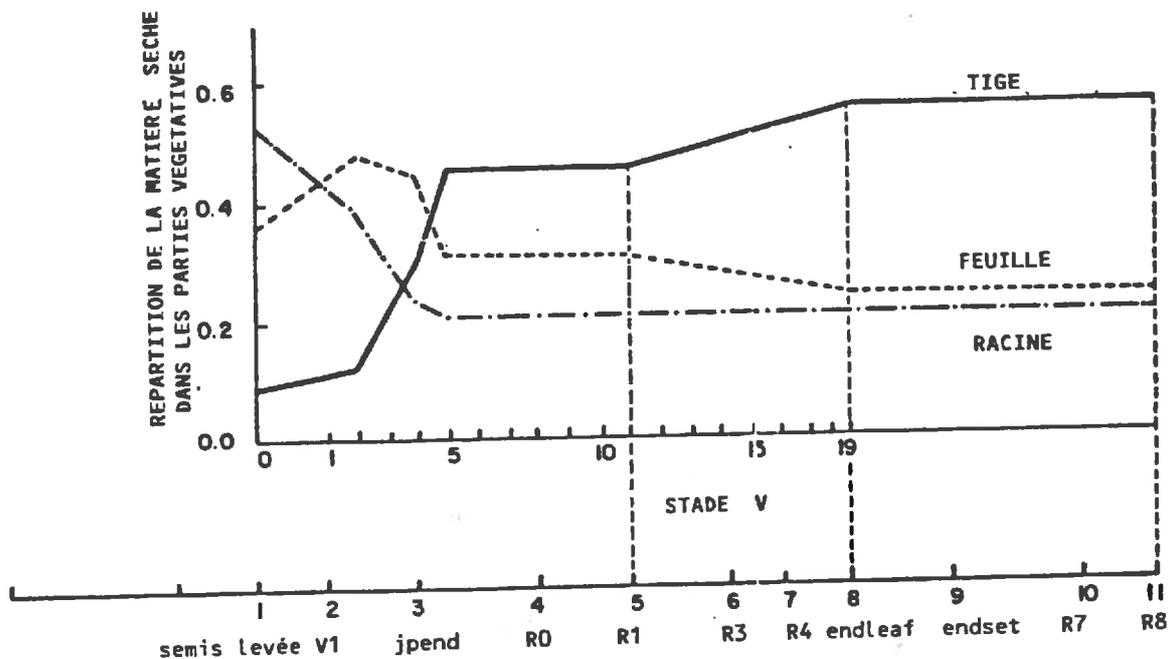
R_{Op} = $3.5 \cdot 10^{-4}$ g CH₂O respirés/ g CH₂O fixés par photosynthèse

$F(T)$ = effet température

P_G = photosynthèse brute

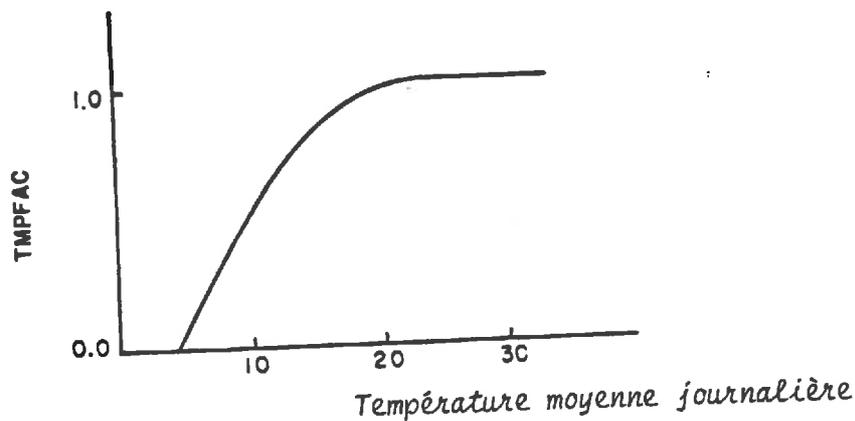
Effet température (selon Mc CREE, 1974) :

$$F(T) = \sum_{h=1}^{24} .044 + .0019 T(h) + .001 T(h)^2$$



ECHELLE PHENOLOGIQUE

**figure 17 : REPARTITION DES ASSIMILATS
DANS LES PARTIES VEGETATIVES**
(tirée de WILKERSON et al., 1985)



**figure 18 : FACTEUR DE REDUCTION DE LA CROISSANCE MAXIMALE DES
ORGANES REPRODUCTEURS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE**
(tirée de WILKERSON et al., 1985)

2. La répartition des assimilats

La répartition des assimilats aboutit à un apport de matière sèche journalier dans les différents organes de la plante, sous forme de glucides ou d'acides aminés s'il s'agit des remobilisations azotées. Les lois de répartition varient selon que l'on s'adresse aux organes végétatifs ou reproducteurs.

Il faut souligner que le modèle ne tient pas compte des phénomènes de translocation, il suppose qu'il n'existe aucun obstacle au transfert des assimilats depuis les feuilles vers les organes puits. Or PAUL et PLANCHON (1983) ainsi que GRIMAPETTENATI et al. (1987) montrent que la vitesse des transferts varie selon le stade de développement. Signalons, à titre d'exemple, que le modèle SOYMOD/OARDC (CURRY et al., 1979 - MEYER et al., 1981) décrit finement le transport de la sève élaborée dans le phloème.

. Répartition dans les parties végétatives

Le schéma de répartition entre feuilles, tiges et racines dépend du stade de développement de la culture et du niveau de stress hydrique.

La figure 17, en accord avec HANWAY et WEBER (1971) ainsi que DAYDE et ECOCHARD (1984), montre, en particulier, que la consommation des feuilles en assimilats n'est prépondérante qu'au début, rapidement la fonction source l'emporte sur la fonction puits.

En cas de stress hydrique, la répartition est modifiée en faveur des racines et le coefficient de répartition racinaire peut croître jusqu'à un maximum de 50%. C'est le facteur de stress TURFAC qui intervient.

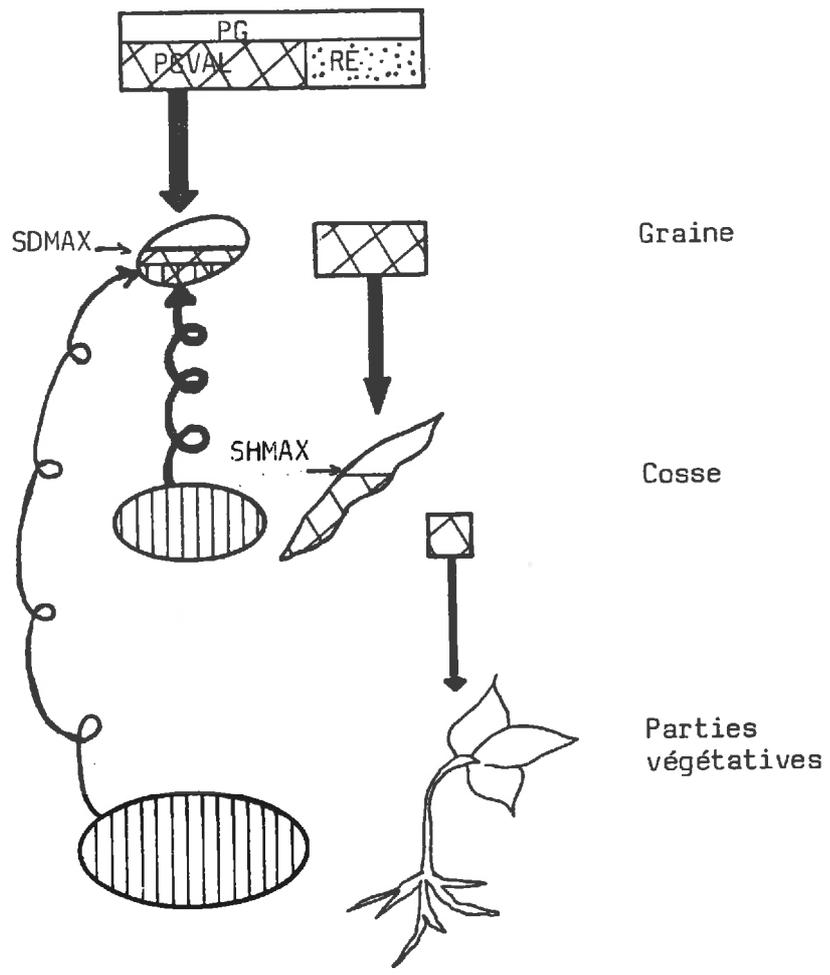
. Répartition vers les parties fructifères

Dès leur apparition cosses puis graines (les gousses se remplissent à partir de leur 10^e jour) ont la priorité quant à leur alimentation en assimilats.

Si les assimilats ne sont pas limitants, cosses et graines sont remplies jusqu'à un maximum fonction de la température (TMPFAC représenté figure 18) et de la variété de soja (SHVAR et SDVAR respectivement pour les cosses et les graines). Si SHMAX et SDMAX sont les accumulations maximales autorisées pour les cosses et les graines respectivement alors :

$$\begin{aligned} \text{SHMAX} &= \text{SHVAR} \times \text{TMPFAC} && \text{en mg/cosse/jour} \\ \text{SDMAX} &= \text{SDVAR} \times \text{TMPFAC} && \text{en mg/graine/jour} \end{aligned}$$

A partir du stade "fin formation des organes fructifères", commencent les remobilisations azotées et SDMAX est alimenté non seulement par la photosynthèse mais aussi, et en priorité, par la



Répartition des assimilats
 et remobilisations azotées
 cas de photosynthèse non limitante

Figure 19

migration des petites molécules azotées (acides aminés) venant des organes végétatifs.

En situation de photosynthèse limitante ($PG < RE$), la croissance des graines n'est assurée que par les remobilisations azotées dont une partie peut être utilisée pour la respiration d'entretien (voir partie sur les remobilisations azotées).

Une fois que les graines puis les cosses sont alimentées, le surplus est réparti dans les organes végétatifs selon le schéma précédent.

Au plan phénologique : PODSTART donne le départ à la croissance des gousses donc des graines (10 jours après), après ENDSET commencent les remobilisations azotées dont la vitesse est déterminée par τ_5 .

$$\tau_5 = \frac{J - \text{ENDSET}}{R_7 - \text{ENDSET}}$$
 où J est le jour du calcul

Donc le schéma de répartition est évolutif et établit des priorités entre les organes (figure 19). Pour les modèles plus simples, qui répartissent globalement la matière sèche entre grains et reste de la plante, SPAETH et SINCLAIR (1985) proposent d'utiliser un indice de récolte évolutif.

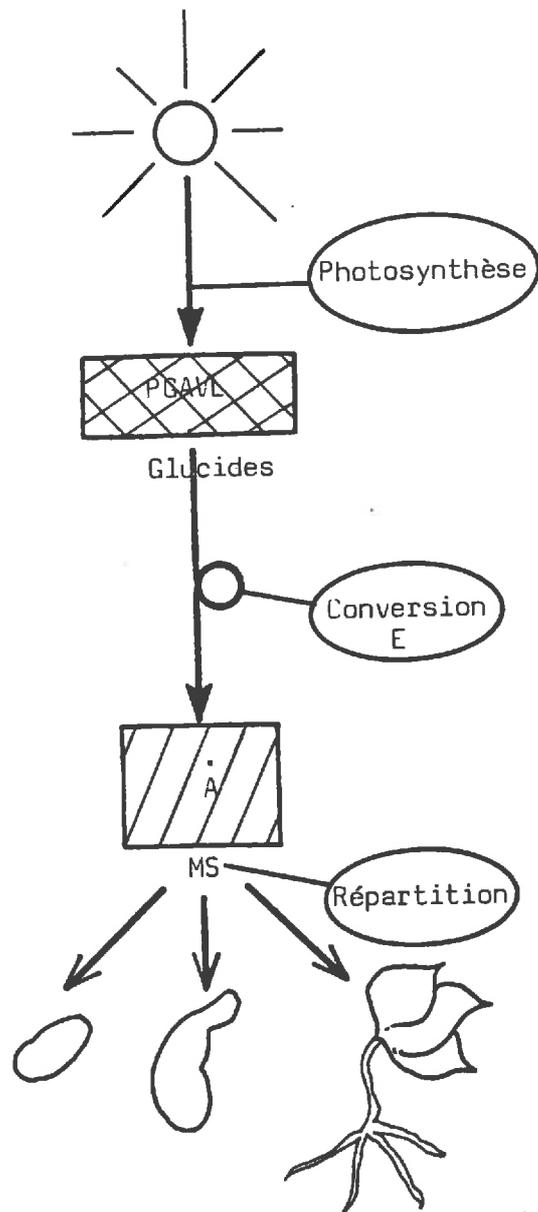
3. La conversion

Les glucides (CH_2O), issus de la photosynthèse, doivent être convertis en matière sèche composite de feuille, tige, racine, cosse et graine. Les synthèses utilisent une partie du CH_2O comme source d'énergie (respiration de croissance) et l'autre partie comme substrat. Il en résulte des coefficients de conversion (ou efficacité de croissance) qui diffèrent entre les organes.

En ce qui concerne les remobilisations azotées, il ne s'agit plus de convertir des glucides mais des acides aminés, ce qui modifie les coefficients. On constate que ce mode d'alimentation des graines est beaucoup moins coûteux pour la plante.

ef : 1 gramme feuille.....	1.61 g CH_2O
et : 1 gramme tige.....	1.44 g CH_2O
era: 1 gramme racine.....	1.37 g CH_2O
ec : 1 gramme cosse.....	1.49 g CH_2O
eg : 1 gramme graine (photosynthétats).....	2.08 g CH_2O
er : 1 gramme graine (acides aminés remobilisés).....	1.45 g CH_2O

En fait, CALMES et al (1987) montrent que ces efficacités de croissance peuvent varier d'une variété à l'autre.



Passage de la production de glucides à la matière sèche par organe

Figure 20

En réalité, dans SOYGRO, les modélisateurs n'ont pas adopté tout à fait la démarche décrite ci-dessus, qui consiste à répartir les glucides dans les organes puis à les convertir en matière sèche au moyen des efficacités de croissance partielles. Ils ont préféré réaliser la conversion avant la répartition (figure 20) en calculant une efficacité de croissance globale (E).

4. La croissance en masse

La matière sèche reçue par les organes de la plante ne va pas contribuer en totalité à la croissance en masse :

$$\dot{W} = \dot{A} - \Sigma \dot{S} \quad (1) \quad \text{pour l'ensemble du couvert}$$

$$\dot{W}_{ov} = X_{ov} \dot{A} - \dot{S}_{ov} - \dot{R}_{a_{ov}} \quad \text{pour un organe végétatif}$$

feuille, tige ou racine

$$\dot{W}_c = X_c \dot{A} - \dot{R}_{a_c} \quad \text{pour la cosse}$$

$$\dot{W}_{gr} = X_{gr} \dot{A} + \Sigma e_r \times \dot{R}_a \quad \text{pour la graine}$$

où :

- \dot{W} = taux de croissance en masse en g/m²/jour.
- \dot{A} = assimilation nette journalière en g/m²/jour ($\dot{A} = E \times PGVAL$)
- X = coefficient de répartition pour l'organe considéré ($\Sigma X = 1$)
- \dot{S} = taux de sénescence en g/m²/jour.
- R_a = taux des remobilisations azotées en g/m²/jour.

La sénescence est considérée comme une réduction de la croissance (cf paragraphe sénescence). Elle n'affecte que les parties végétatives, le vieillissement des cosses étant seulement dû qu'aux remobilisations.

La gestion de la croissance de chaque type d'organe nécessite de bien modéliser leur mise en place, et d'évaluer correctement les transferts entre organes.

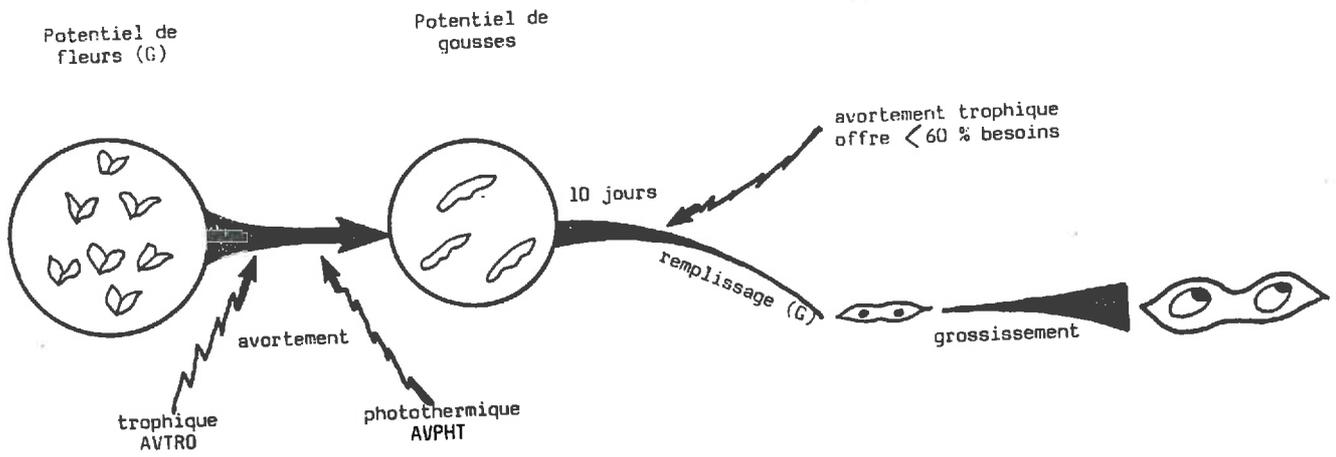
. La mise en place de nouveaux organes

En réalité, les organes végétatifs ne sont pas individualisés dans SOYGRO et on distingue en fait :

- une masse et une surface foliaire
- une masse caulinaire
- une masse et une longueur racinaire,

ce qui implique des termes de passage masse-surface foliaire (voir paragraphe suivant) et masse-longueur racinaire. On notera, en particulier, que le modèle ne fait pas la différence entre la tige principale et les ramifications.

(1) Bien qu'impropre dans ce cas là, la notation \dot{W} est utilisée pour exprimer une variation journalière (et non instantanée) : $\Delta W / \Delta t$ avec $\Delta t = 1$ jour.



(G) : paramètre génétique

figure 21 : Production d'organes reproducteurs, prise en compte des phénomènes d'avortement

La mise en place des organes reproducteurs est plus complexe, (figure 21) elle est focalisée sur les gousses sur lesquelles les facteurs trophiques vont jouer un rôle capital.

Si la photosynthèse n'est pas limitante, la production journalière de gousses (PODADD) est fonction d'un potentiel (PODVAR, qui est un paramètre variétal assimilable à un potentiel de fleurs) réduit de deux facteurs d'avortement, un facteur trophique (AVTRO) et un facteur photothermique (AVPHT) :

$$\text{PODADD} = \text{PODVAR} \times \text{AVTRO} \times \text{AVPHT}$$

$$\text{AVTRO} = \text{PG} / \text{PGmax}$$

$$\text{AVPHT} = \text{R}(j) \text{ réelle} / \text{R}(j) \text{ optimale}$$

où R(j) optimale est calculée avec une température et une photopériode optimales

Dans SOYGRO, les phénomènes d'avortement se produiront à partir de R₃, une fois les gousses présentes. Or, bien que restant un phénomène secondaire, une période préflorale froide peut avoir des incidences sur le nombre d'organes reproducteurs en production (PIGEAIRE, 1984).

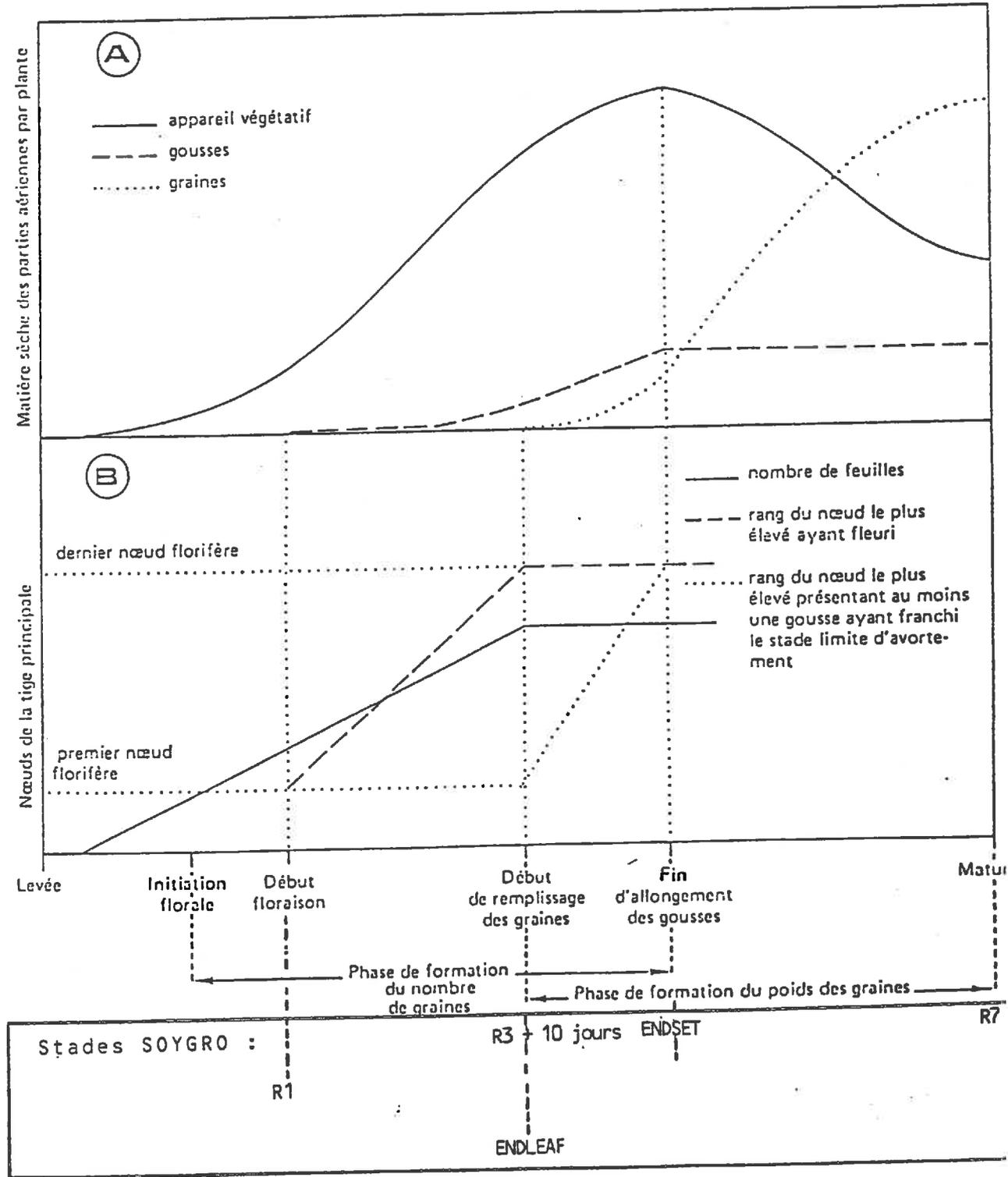
Quand la photosynthèse est limitante, les graines constituent le puits prioritaire, et la production de nouvelles gousses est calculée à partir de la matière sèche restante.

$$\text{PODADD} = \frac{\text{PGLEFT}}{\text{SHMAX} \times \text{ec}}$$

où PGLEFT = PGVAL - PGPD (assimilats utilisés pour les graines)
SHMAX = accumulation maximale (voir paragraphe précédent)
ec = efficacité de croissance de la cosse

L'âge des gousses est un facteur essentiel dans le modèle. En effet, la gousse se remplit au bout de son 10ème jour (ou elle avorte), elle cesse sa croissance au bout de 14 jours. Si au 10ème jour, les photosynthétats disponibles sont insuffisants (inférieurs à 60 % du besoin des gousses) alors il y a avortement proportionnel au défaut de photosynthétats. On peut s'étonner de l'utilisation du jour comme unité de temps physiologique, et compte-tenu du rôle important joué par le facteur trophique, une paramétrisation introduisant le poids des organes nous semblerait plus logique.

figure 22 : Schéma récapitulatif des étapes de croissance et de développement des appareils végétatif et reproducteur (tirée de PIGEARE, 1984) - comparaison avec SOYGR0



Quand la gousse n'a pas avorté, elle se remplit d'un seul coup de la quantité moyenne de graines par gousses (SDPDVR), il s'agit d'un paramètre variétal. Ainsi le stade limite d'avortement des gousses correspond au début du remplissage. La modélisation de la mise en place des gousses à l'échelle du couvert est en accord avec le schéma proposé par PIGEAIRE (1984) reproduit sur la figure 22.

En résumé, seul l'avortement des gousses est réellement modélisé, les avortements au niveau des fleurs et des graines sont implicitement pris en compte dans les paramètres variétaux PODVAR et SDPDVR

. Les remobilisations azotées et la croissance des graines

Une fois que les organes reproducteurs sont en place, commencent les remobilisations azotées qui constituent alors l'alimentation première des graines. Les protéines remobilisables dans les feuilles, les tiges, les racines et les cosses sont "cassées" en acides aminés qui sont transportés dans les graines et resynthétisés en protéines. Certains auteurs mentionnent également des remobilisations sous forme glucidique (CALMES et al., 1987)

Le pool protéique remobilisable de chaque organe (PR_0) est calculé de façon expérimentale, à partir de dosages avant et après migration. Ces mesures permettent de déterminer la teneur azotée du couvert (16% du poids des protéines sont de l'azote) nécessaire au calcul de la photosynthèse brute. La quantité maximale de protéines remobilisable par jour ($M_0 \text{ max}$) est obtenue par la formule :

$$M_0 \text{ max} = \frac{PR_0}{1.3 \tau_5} \quad (\text{source listing SOYGR0})$$

où τ_5 = % de temps de "remplissage des grains" écoulé.
(voir paragraphe précédent)

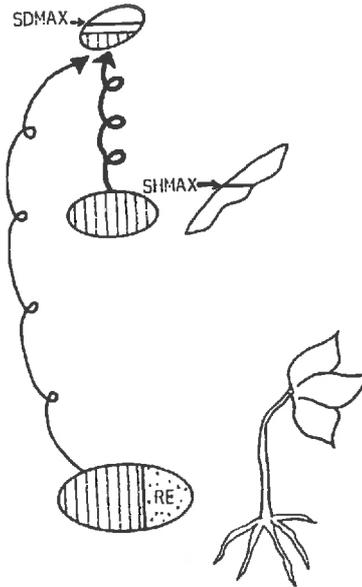
Ainsi, la quantité de protéines remobilisées décroît à mesure que la graine se remplit.

Il est important que le modèle prenne des précautions vis à vis de ce phénomène de transfert. Un plafond de 1.5 % du poids des feuilles prévient des remobilisations excessives suite à une perte de poids du feuillage (sécheresse). De plus, si la photosynthèse est faible alors une partie seulement des protéines remobilisables migrent vers les graines et, le pool de CH_2O étant faible, elles sont en partie respirées (figure 23 au verso).

Par ordre de priorité décroissante, l'alimentation de la graine est donc assurée par :

- les protéines des cosses
- les protéines des feuilles
- les protéines des tiges
- les protéines des racines
- les photosynthétats

PG
RE



Répartition des remobilisations azotées en cas de photosynthèse limitante

Figure 23

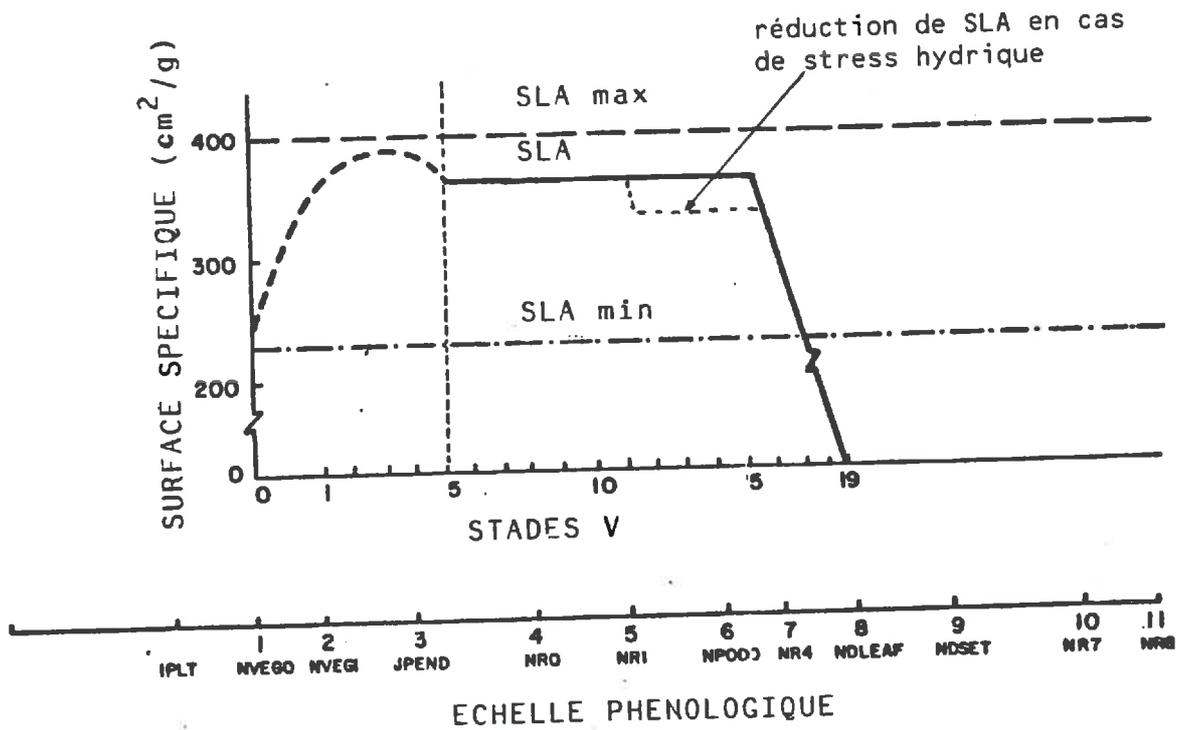


figure 24 : EVOLUTION DE LA SURFACE SPECIFIQUE

(d'après WILKERSON et al., 1985)

Toutefois, le poids des graines ne peut dépasser 78 % du poids des gousses (cosses + graines). Ce paramètre est très important, c'est lui qui permet de limiter le poids du grain. On peut simplement s'étonner qu'il ne s'agisse pas d'un paramètre variétal car des auteurs ont établi le caractère génotypique du poids maximal de grains (BLANCHET et al., 1977; VIDAL et ASTRUC, 1984). Cependant, le poids du grain est également limité par la durée de la phase de remplissage qui, elle, dépend de la variété.

. Bilan de la croissance en masse : les composantes du rendement

Dans SOYGRO, le rendement est directement calculé par l'accumulation de matière sèche dans les graines. Néanmoins, le calcul du nombre de gousses permet d'accéder aux composantes du rendement classiques :

nombre de gousses/m² X nombre de graines/gousse X poids du grain.

5 . La croissance surfacique du feuillage, l'indice foliaire

La surface spécifique (SLA dans le modèle) est la variable qui transforme la croissance pondérale en croissance surfacique. Elle dépend d'un paramètre variétal, du stade de développement (figure 24) et peut être affectée par le stress hydrique.

En l'absence de stress hydrique

En début de période végétative (exactement avant la formation du 5ème noeud), l'indice foliaire est limité par le potentiel génétique qui fixe la surface maximale des feuilles, et par le rythme de formation des noeuds qui dépend de la température (cf paragraphe phénologie). La croissance en surface étant (dans ce cas) donnée en entrée du modèle, le calcul de la surface spécifique ne vise qu'à contrôler la cohérence de la croissance en surface :

SLA = croissance en surface / croissance en masse

En condition de ciel nuageux, la photosynthèse est faible, ce qui se répercute sur la croissance en masse des feuilles et SLA peut devenir très grand : une surface spécifique maximale est donnée pour limiter la croissance en surface en cas de pénurie de CH₂O. De la même façon, une surface spécifique minimale limite la photosynthèse si les feuilles atteignent une épaisseur maximale. On limite ainsi les puits puis la source par un effet de feed-back. La croissance surfacique potentielle peut donc être modifiée si SLA ne répond pas aux conditions précédentes.

Par la suite, la surface spécifique des nouvelles feuilles (c'est-à-dire du nouveau poids de matière sèche foliaire) est constante, jusqu'à un stade dit "épaississement des feuilles" (EPF) à partir duquel elle décroît linéairement jusqu'à s'annuler en fin de période végétative. Le stade "épaississement des feuilles" est calculé de la façon suivante :

$$R_1 - EPF = 60 \% (R_1 - ENDLEAF)$$

Il s'agit en fait d'une auto-limitation du développement foliaire en fin de parcours, afin que les feuilles jouent davantage un rôle de stockage.

Intervention du stress hydrique

Le stress hydrique peut perturber cette évolution sans contrainte de la surface foliaire (dont les points de repère sont les stades 5ème noeud et EPF), en diminuant la surface spécifique par le biais du facteur TURFAC. Il en résulte une limitation de l'augmentation de l'indice foliaire, ce qui revient à simuler un épaississement précoce des feuilles. Cette modélisation est en accord avec BOYER (1970) qui montre que l'expansion foliaire est l'une des premières fonctions affectées par la contrainte hydrique.

6. Synthèse sur le fonctionnement source-puits du module de croissance.

Le concept "source-puits" est très utilisé en modélisation. Il est bien analysé par GIFFORD et EVANS (1981) et sert souvent de fil conducteur dans l'élaboration du modèle car les interactions entre les sources d'assimilats et les puits consommateurs contrôlent, en grande partie, la mise en place du rendement (PEAT, 1984).

Dans SOYGRO, au début de la croissance végétative, des limitations sont induites par la faiblesse des puits jeunes feuilles et tiges, ou par la faiblesse de la source photosynthétique. Après le stade V5 (5ème noeud) on suppose que le surplus de photosynthétats induit de nouveaux méristèmes foliaires. De V5 jusqu'à la fin du développement végétatif le modèle est conduit en source : il y a toujours suffisamment de feuilles, de tiges et de racines pour utiliser les photosynthétats disponibles. Pendant la croissance fructifère, des limitations sont possibles, dues à la faiblesse des puits ou de la photosynthèse. Pendant la phase de transition, la croissance des feuilles diminue, la charge des gousses et la force des puits pour la croissance des graines se mettent en place.

Comme nous l'avons déjà mentionné, des facteurs hormonaux interviennent également dans la régulation des interactions sources-puits, ce que le modèle ignore. De même, ne simulant pas le fonctionnement des nodosités, il ne tient pas compte des interactions sources-puits vis à vis de la fixation azotée.

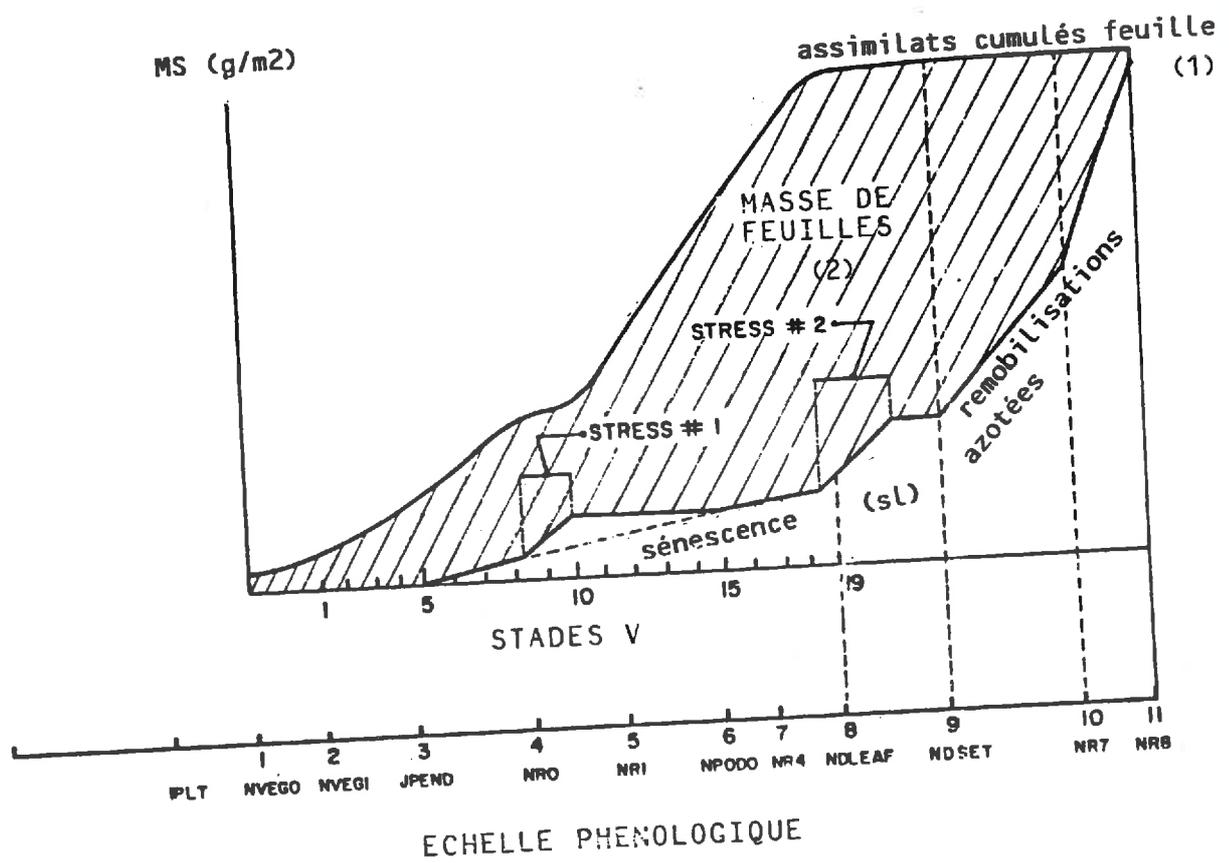


figure 25 : SENESCENCE ET CROISSANCE

- (1) : croissance brute
- (2) : croissance nette

IV. LE MODULE DE SENESCENCE

La sénescence réelle (sens large) a deux composantes : la sénescence au sens strict, qui correspond au vieillissement des structures, et les remobilisations azotées (figure 25). Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la sénescence s.s. qui ne concerne que les parties végétatives. La sénescence foliaire, qui commence dès la formation du 5ème noeud, s'accélère quand interviennent les remobilisations azotées. La sénescence des tiges est proportionnelle à celle des feuilles et toutes deux peuvent être affectées par un stress hydrique. Seul ce dernier facteur peut générer une sénescence racinaire.

Le vieillissement normal de la plante commence dès la formation du 5ème noeud et croît linéairement jusqu'à l'apparition du 14ème noeud où elle atteint 12 % du poids de la matière sèche foliaire. La sénescence est ensuite constante jusqu'au stade ENDSET. Entre ENDSET et R₇ la sénescence est liée aux remobilisations azotées : pour 1 gramme de protéines remobilisées il y a 1 gramme de feuilles sénescentes. La sénescence des tiges, qui ne débute qu'à R₇, est proportionnelle à celle des feuilles.

En cas de stress hydrique, à la sénescence normale vient s'ajouter une sénescence due à la sécheresse. Quand la plante subit un stress le jour J, la sénescence "hydrique" ne se produira qu'au jour J + 4 ; en effet, il semble que 4 jours soient nécessaires à l'abscission (1).

$$SENES_j = 0.05 \times (1 - SWFAC_{j-4}) \times WTLF_{j-4}$$

où SENES_j = sénescence du jour j due au stress hydrique
 WTLF = poids sec de feuilles
 SWFAC = stress hydrique

La sénescence "stress hydrique" ne peut donc pas excéder 5% du poids sec foliaire. Comme le montre la figure 25, un stress hydrique est réversible avant le stade ENDLEAF.

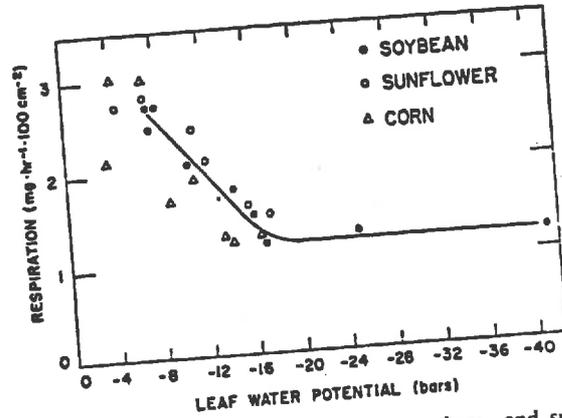
Toutefois, la sénescence totale ne peut dépasser un seuil (SENMAX) qui dépend du développement végétatif.

STADE V	3	5	10 et plus
SENMAX en % masse fol.	0	20	60

Ainsi, en cas de stress hydrique, la sénescence peut commencer dès le stade V3.

En cas de gel léger (-2°C) le feuillage est détruit et en cas de gel sévère (-6.5°C) c'est la plante entière qui est détruite.

(1) abscission : mécanismes dirigeant la chute des feuilles



Rates of dark respiration in corn, soybean, and sunflower plants at various leaf water potentials. The data were collected from two different plants for each species.

Figure 26 Tirée de Boyer, 1970

Influence d'une contrainte hydrique sur la respiration

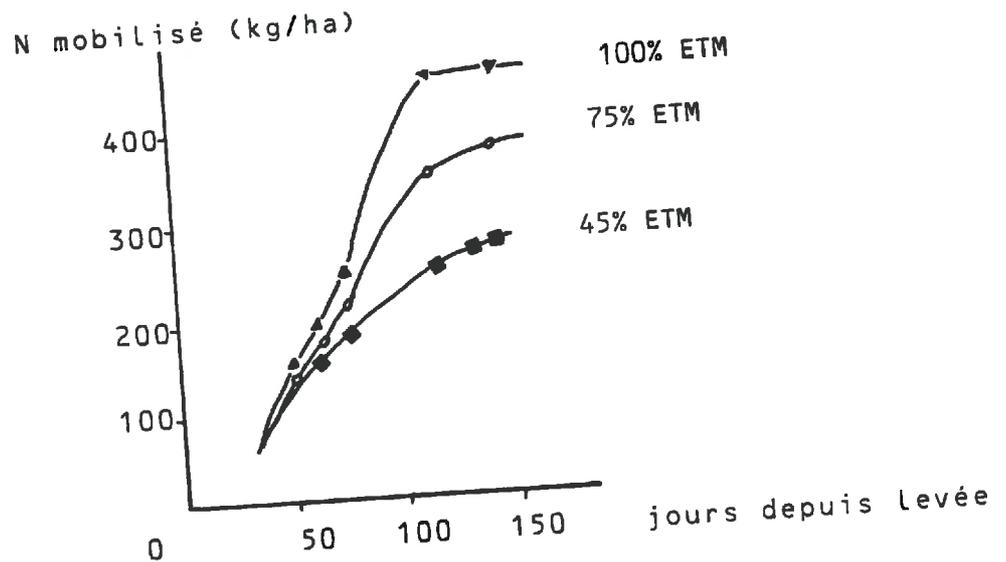


Figure 27 : QUANTITE D'AZOTE MOBILISE SELON LA CONTRAINTE HYDR (d'après PUECH et BOUNIOLS, 1986)

V. ROLE DES FONCTIONS DE STRESS HYDRIQUE.

Le calcul des fonctions de stress hydrique sera vu en détail dans le chapitre C. Au cours de la description précédente, deux fonctions de stress hydrique sont apparues : SWFAC et TURFAC, dont les rôles respectifs sont résumés dans le tableau ci-dessous. La fonction TURFAC est la plus sensible des deux fonctions, respectant une certaine hiérarchie dans la sensibilité des fonctions physiologique au stress hydrique (BRADFORD et HSIAO, 1982).

SWFAC	TURFAC
<ul style="list-style-type: none">- photosynthèse brute- sénescence- croissance des racines	<ul style="list-style-type: none">- répartition des assimilats- expansion foliaire- phénologie

Si l'essentiel des effets physiologiques d'une contrainte hydrique semble bien pris en compte, on peut toutefois formuler quelques remarques.

Ainsi, le stress hydrique réduit également la respiration (figure 26) et cet effet a tendance à contre-balancer la réduction de la photosynthèse brute. Par conséquent, l'effet résultant au niveau du potentiel de croissance journalier serait moindre que ce qui est simulé par le modèle. De plus, le stress hydrique touche la photosynthèse brute directement par le facteur SWFAC, mais aussi indirectement par la réduction du LAI suite à l'accélération de la sénescence ou à la diminution de la surface spécifique. On peut se demander si, en conditions hydriques réellement limitantes, le cumul de ses effets est bien réaliste.

Par ailleurs, dans le modèle, le stress hydrique ralentit le développement reproducteur de la culture. Or il semble que les processus soient plus complexes (voir page 39) avec, selon l'intensité du stress, possibilité de ralentissement ou au contraire d'accélération.

Enfin, en cas de contrainte hydrique sévère, la mobilisation de l'azote est pénalisée (figure 27), ce qui se répercute sur les capacités photosynthétiques. Dans ce cas, l'hypothèse d'une alimentation azotée non limitante ne se justifie plus et il serait important de prendre en compte les interactions entre stress hydrique et activité nodulaire.

VI. CONCLUSION

En résumé, le fonctionnement du modèle repose sur :

- un calendrier phénologique qui établit des points de repère,
- le fonctionnement trophique de la plante par les interactions sources-puits,
- l'intervention du milieu extérieur sous forme de fonctions de stress thermique et hydrique

Nous avons constaté qu'un certain nombre de choix, quant au niveau de précision de la description des phénomènes, avaient été faits en lien avec les objectifs du modèle. En effet, SOYGRO est un modèle qui fonctionne à l'échelle du couvert végétal, pour simuler des résultats agronomiques liés à la production. Ainsi, certaines fonctions jugées comme non limitantes vis à vis de la fonction de production ne sont pas prises en compte : alimentation azotée, translocations, ..., ce qui peut être discutable dans certains cas : interactions stress hydrique - absorption d'azote, par exemple.

D'autres phénomènes ne sont pas intégrés dans le modèle car les mécanismes en sont mal connus. C'est en particulier le cas des stress qui agissent sous forme de stimuli hormonaux et qui peuvent engendrer des réponses physiologiques différentes selon l'intensité de la contrainte subie par la plante.

P H E N O L O G I E	SENSIBILITE A LA PHOTOPERIODE	SEUIL : Nuit max. Nuit min en h. INTENSITE : Durée max. Durée min en UTN	
	CYCLE	Durée R1-R7 en UTP	
	REPRODUCTEUR	Découpage R1-R3 (Type de R1-R4 croissance) R1-NDLF R1-NDST } en % R1-R7	
	DUREE DE LA MATURATION	R7-R8 en UT	
E L A B O R A T I O N	R E N D E M E N T	PRODUCTION D'ORGANES REPRODUCTEURS	Nombre maxi de gousses initiées : PODVAR (m ² /j)
			Nombre moyen de grains par gousses : SDPDVR
		POTENTIEL DE CROISSANCE DES ORGANES REPRODUCTEURS	SHVAR pour la cosse (mg/j) SDVAR pour la graine (mg/j)
ELABORATION	index plastochronique : TRIPOL en UT		
DU	surface spécifique témoin (entre VS et EPF) : SLAVAR en cm ² /g		
LAI	surface témoin (feuille adulte du 8e au 10e noeud) : SIZELF cm ²		

TABLEAU 4 DES PARAMETRES VARIETAUX

B. ADAPTATION DE SOYGRO AUX VARIETES CULTIVEES EN FRANCE

La gamme des précocités de soja cultivées dans nos régions s'étend des groupes 00 aux groupes II. Aussi, l'utilisation de SOYGRO demande t-elle une adaptation du modèle à des variétés plus précoces que celles initialement proposées.

En préambule à ce travail d'adaptation, nous ferons l'hypothèse que les différences variétales reposent uniquement sur les paramètres sensibles à la variété tels qu'ils sont définis dans le modèle (tableau 4). Toutefois, il faut être conscient que la limite entre paramètres variétaux et paramètres indépendants de la variété reste liée à la diversité des variétés testées pour la mise au point du modèle.

Pour comprendre le rôle joué, dans le modèle, par les paramètres variétaux, nous présentons une analyse de sensibilité qui permet d'orienter le travail d'adaptation ultérieur qui concerne 3 variétés de précocité I et II :

- . Weber : indéterminée, précocité I
- . Kingsoy : indéterminée, précocité II
- . Inra 172-16 : déterminée, précocité I

Compte tenu de l'importance prise ces dernières années par les variétés très précoces : à l'origine du développement de la culture en principale au nord et en dérobée au sud, nous proposons également des valeurs pour une précocité 00, sur des bases essentiellement bibliographiques (JONES et al., 1988b).

PARA-METRE	- 20%				- 10%				+ 10%				+ 20%			
	TOU		VAL		TOU		VAL		TOU		VAL		TOU		VAL	
	84	86	84	86	84	86	84	86	84	86	84	86	84	86	84	86
Nuicmx	-	-	-	-	5.9	-2.1	17.7	-10.0	-3.4	-12.2	-6.6	-12.5	-	-	-	-
Duremx	-3.1	2.3	4.0	-1.8	-1.0	-0.9	2.8	-2.6	-0.6	0.2	-0.9	1.2	-2.0	3.8	0.3	3.0
R1-R7	-27.6	-26.7	-19.5	-27.2	-15.7	-10.9	-8.0	-12.7	9.6	17.3	11.1	15.3	-	-	-	-
R7-R8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TRIFOL	-0.4	-0.8	-0.5	-0.7	-0.3	-0.2	-0.3	-0.05	0.2	0.1	0.2	0.08	0.4	0.2	0.4	0.1
PODVAR	-7.2	-8.2	-7.6	-5.6	-3.3	-3.2	-3.4	-2.2	3.0	3.1	3.4	1.6	5.5	5.6	5.9	3.2
SDPDVR	-	-	-	-	-4.3	-4.4	-4.0	-3.4	3.7	3.8	4.0	2.8	-	-	-	-
SHVAR	1	2.1	0.09	2.6	0.5	0.9	0.2	1.6	-0.2	-1.1	-0.1	-1.5	-1.0	-1.9	-0.9	-3.4
SDVAR	-8.6	-8.9	-8.3	-8.0	-4.3	-4.4	-4.0	-3.4	3.6	3.8	4.0	2.8	6.9	6.6	6.9	5.9
SIZELF	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.2	-0.09	0.1	0.08	0.2	0.05	0.2	0.1	0.3	0.1
SLAVAR	-1.8	-1.6	-1.3	-1.0	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.6	0.5	0.5	0.3

Tableau 5 : ANALYSE DE SENSIBILITE VARIETALE DE SOYGRO
variation de rendement par rapport au témoin en %

Découpage du cycle	Toul		Val	
	84	86	84	86
indeterminé	0	0	0	0
déterminé	+8%	+3%	+3%	+4%

tableau 6 : EFFET DU DECOUPAGE DU CYCLE REPRODUCTEUR SUR LE RENDEMENT
(les 2 types de découpages sont donnés au chapitre A)

I. ANALYSE DE SENSIBILITE VARIETALE

Le modèle comporte 87 paramètres, qui ne sont pas tous indépendants les uns des autres. Il y a des paramètres d'ajustement (exemples des paramètres définissant les courbes de réponse photosynthétique aux facteurs limitants, figures 15) et des paramètres mesurés. Ce sont ces derniers qui composent l'essentiel des 17 paramètres liés à la variété.

Parmi ces paramètres variétaux, certains définissent le développement de la plante, d'autres en gèrent la croissance (élaboration du feuillage et du rendement). Les premiers caractérisent le groupe de précocité, pour un même type de croissance (ECOCHARD, 1986) ; tandis que les seconds dépendent de l'ensemble des éléments du potentiel de production variétal.

La sensibilité du modèle aux paramètres variétaux indique le degré de précision nécessaire pour chacun d'eux et par suite, l'intérêt de mettre en place des expérimentations spécifiques pour les mesurer.

Dans une première approche, nous avons choisi de sélectionner des conditions d'alimentation en eau non limitantes et donc nous n'avons pas pris en compte le module de stress hydrique. L'étude entreprise permet donc de tester la sensibilité du modèle sur les aspects phénologie, croissance et élaboration du rendement en condition de cultures optimales.

1. Conditions générales

Les paramètres recommandés, dans SOYGRO, pour la variété WAYNE (groupe de précocité III) nous ont servi de référence témoin, en ce sens que nous avons fait varier la valeur de ces paramètres dans des fourchettes de $\pm 10\%$ et $\pm 20\%$ pour faire des simulations, en 2 sites différents : Valence et Toulouse et pour 2 années climatiquement différentes : 1984 et 1986 (l'année 1984 étant plus froide que l'année 1986 - voir annexe 11). Nous appellerons, de même, rendement témoin, la valeur simulée du rendement pour la variété WAYNE.

En ce qui concerne le seuil de sensibilité photopériodique, nous avons fait en sorte que la variation soit compatible avec la fourchette de latitudes des régions étudiées. De plus, les paramètres caractérisant le découpage du cycle reproducteur sont complètement liés les uns aux autres. En conséquence, nous n'avons testé que les deux séries de paramètres liés aux deux types de croissance déterminée et indéterminée.

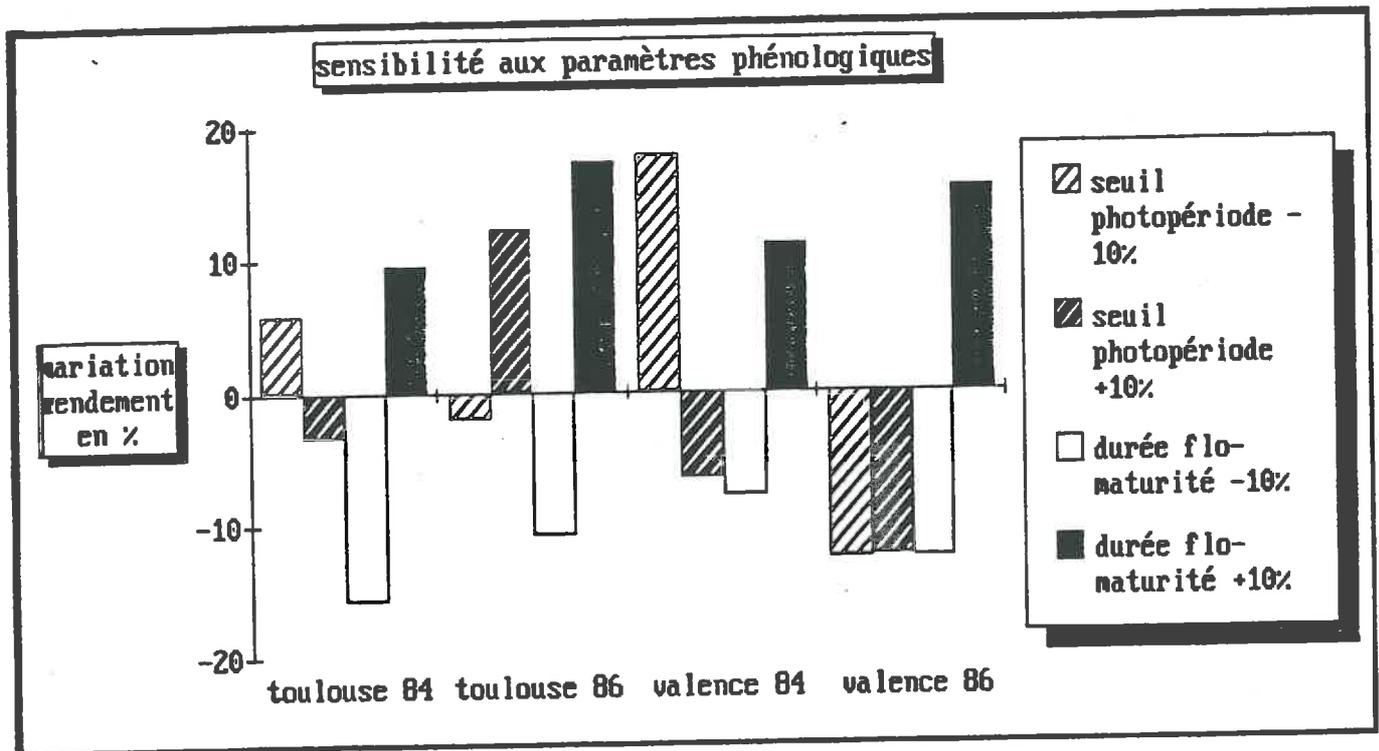


figure 28a

Les résultats, rassemblés dans les tableaux 5 et 6, sont exprimés par la variation du rendement en pourcentage du témoin. Si ces résultats dénotent un effet site, ce ne peut être qu'un effet climatique et non pédologique puisque le sol n'intervient que dans le module stress hydrique qui n'est pas pris en compte.

D'une façon générale, on constate que les paramètres qui ont le plus d'impact sur le rendement sont d'une part, ceux caractérisant la phénologie liée à la reproduction (figure 28.a), d'autre part ceux traduisant l'élaboration du rendement (figure 28.b), alors que l'effet de la mise en place du feuillage semble peu important (figure 28.c).

2. Les paramètres phénologiques

. la sensibilité à la photopériode

On remarque que les deux paramètres Nuit max et Durée max qui définissent la sensibilité à la photopériode fonctionnent de façon aléatoire d'une année à l'autre et d'un site à l'autre.

Cela s'explique par leur double rôle. En effet, ils permettent à la fois de jouer sur la durée du cycle reproducteur, puisqu'ils servent à calculer l'UPT, et de le déplacer puisqu'ils déterminent l'induction florale. Par exemple, une diminution du seuil photopériodique avance la floraison et, le glissement de la période reproductrice qui en résulte, sur des périodes où la durée d'éclairement journalière est plus longue, permet un supplément de photosynthèse, puis de rendement qui peut, certaines années, compenser l'effet du raccourcissement du cycle (ex: année 84).

On notera, toutefois, que le seuil photopériodique (Nuit max) est le paramètre le plus sensible des deux.

. Le cycle reproducteur

La durée globale du cycle reproducteur apparaît comme le paramètre le plus délicat, alors que l'effet du découpage du cycle reste limité (tableau 6). Cependant, on constate que, d'après le modèle, une variété à croissance déterminée tend à être plus productive qu'une variété à croissance indéterminée. C'est-à-dire que le faible nombre de gousses mises en place, à cause d'un stade ENDSET avancé chez les déterminées, est largement compensé par le remplissage du grain.

. La maturation

La durée de la maturation, qui sépare les stades R7 (maturité physiologique) et R8 (maturité de récolte), n'a aucune influence sur le rendement ; ce qui s'explique par le fait qu'au début de cette période (R7), la quasi-totalité de la matière sèche est en place dans les graines (SALADO-NAVARRO et al., 1985).

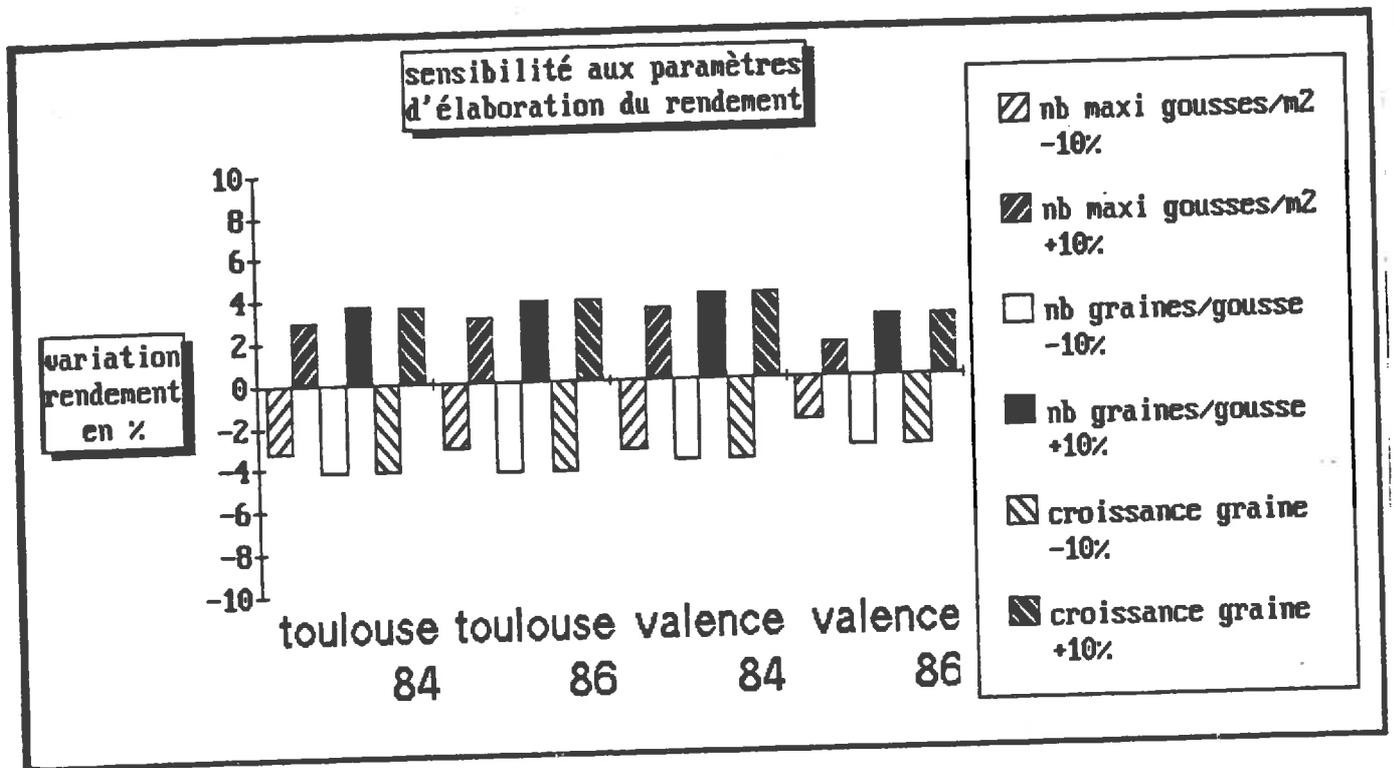


figure 28b

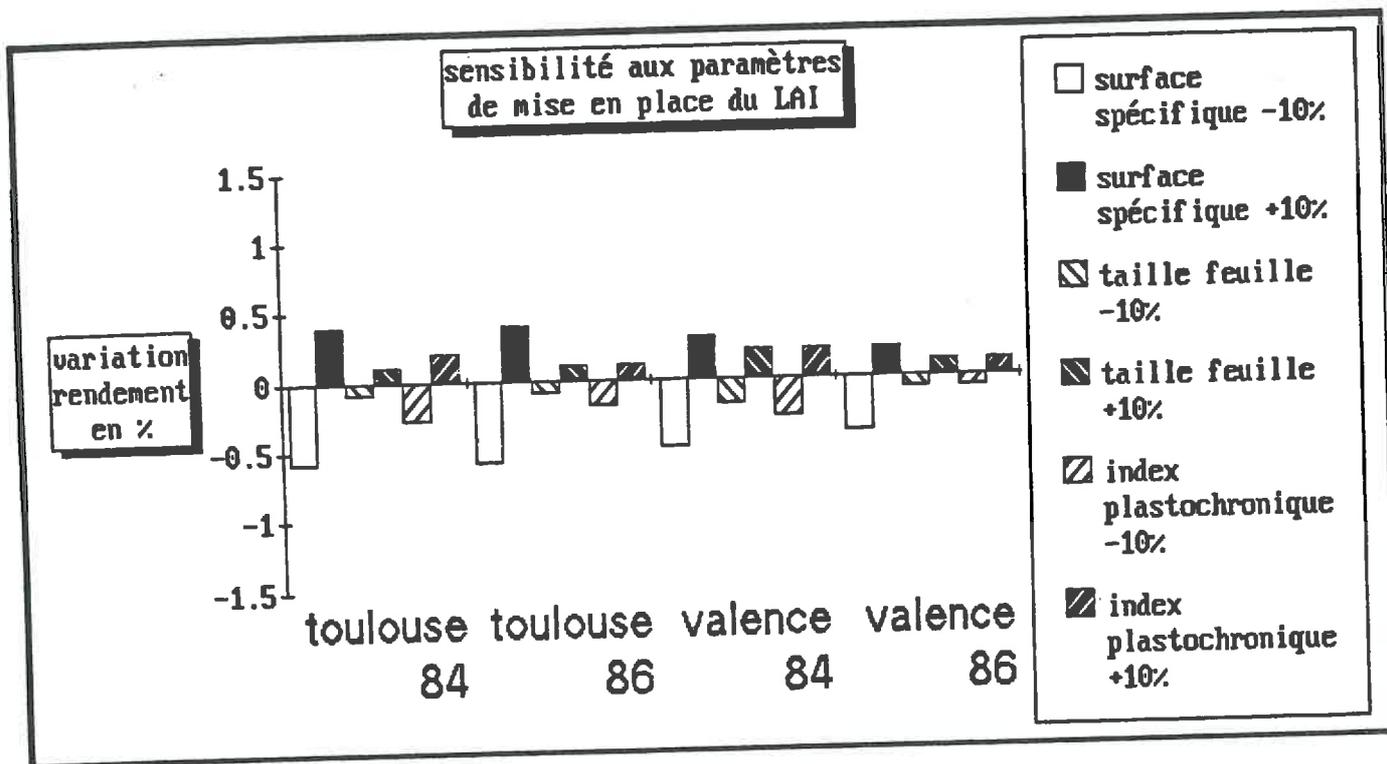


figure 28c

3. Les paramètres d'élaboration du rendement

Le rendement se décompose classiquement en :
nbre gousses/m² x nbre graines/gousse x poids de la graine
Or, ces 3 composantes dépendent d'un certain nombre de paramètres variétaux introduits dans le modèle : nombre maximum de gousses initiées, nombre moyen de graines par gousse et croissance de la graine. L'influence de ces 3 paramètres est très voisine quels que soient le site et l'année (figure 28.b). Par ailleurs, une augmentation du potentiel de croissance des cosses (paramètre SHVAR) provoque une baisse de rendement, d'autant plus importante que l'année est plus chaude (comparaison 84-86). Ce qui s'explique par le fait que les cosses vont utiliser davantage de photosynthétats au détriment des graines. Néanmoins, ce phénomène restera limité par l'ordre de priorité de la répartition, (en premier la graine, et en second la cosse). Toutefois, il semblerait que les deux paramètres de croissance pondérale ne soient pas totalement indépendants ; la croissance pondérale potentielle de la cosse est voisine du double de celle de la graine (WILKERSON et al., 1985).

4. Les paramètres de mise en place de l'appareil foliaire

La faible variation du rendement induite par une modification de $\pm 10\%$ de la taille, de la surface spécifique des feuilles ou de l'index plastochronique (figure 28.c) confirme les observations selon lesquelles un IF de 4.5 correspond à un appareil assimilateur suffisant pour alimenter les parties végétatives et les gousses (BLANCHET et GELFI, 1978).

5. Remarques sur les différences entre sites et années

Les simulations du tableau 5 soulignent la différence de variabilité interannuelle entre Valence et Toulouse vis à vis du rendement : les écarts entre 1984 et 1986 sont plus accusés à Valence.

D'autre part, en 1986, la variation de rendement induite par la variation de l'un quelconque des paramètres liés au rendement est globalement plus faible que celle de 1984 ; cela laisse à penser que le modèle prend en compte des phénomènes de compensation en année chaude (indépendamment du stress hydrique).

PARAMETRES	WAYNE	WEBER	172-16	KINGSOY	var. 00
Nuit max (h)	9.5	9.1	9.3	9.5	8.3
Durée max (UTN)	34	34	34	34	17
R1 - R7 (UPT)	14.5	16.3	15.7	16.3	16
R7 - R8 (UT)	10	5.5	5.5	5.5	5.5
Découpage (%)	20-41-50-60	20-34-36-65	9-16-16-50	20-34-36-65	20-34-36-65
PODVAR (nb gss)	160	180	180	180	180
SDPDVR (gr/gs)	2.10	2.21	2.14	1.94	2.04
SDVAR (mg/j)	5.2	6.1	7.5	5.7	6.0
SHVAR (mg/j)	11.0	12.2	15.0	11.4	12.0
TRIFOL (nbf/UT)	0.420	0.410	0.260	0.450	0.350
SIZELF (cm ²)	173.5	150.5	183.6	154.5	160
SLAVAR (cm ² /g)	320	333	297	217	300

tableau 7 : CALIBRATION VARIETALE

II - ADAPTATION DU MODELE A DES VARIETES DE PRECOCITE I ET II paramétrage proposé pour une variété de type 00

1. Sources de données

Pour réaliser le calage du modèle, nous disposons de résultats d'essais (correspondant aux paramètres variétaux du modèle) conduits de 1984 à 1987 à Montélimar (CETIOM), à Toulouse (INRA), à Nîmes (Compagnie du Bas-Rhône) et à Padoue en Italie (Université), ainsi que les données climatiques correspondantes. Ce jeu de données préexistantes a pu être complété par des mesures personnelles réalisées sur deux parcelles expérimentales en 1987:

- sur la station CETIOM de Montélimar, prélèvements biologiques, installation de tubes pour les mesures de réserve en eau du sol par la méthode neutronique (voir chapitre E) et, grâce à l'appui technique du STEFCE, nous avons pu disposer sur le site d'une station automatique de mesures météorologiques pendant toute la campagne.

- sur la station expérimentale de la Compagnie du Bas-Rhône à Asport (près de Nîmes), prélèvements dans un essai "pilotage de l'irrigation sur soja"; nous bénéficions de l'infrastructure du site d'Asport (en particulier pour les mesures météo).

L'ensemble des données phénologiques et rendement est rassemblé en annexe 2.

En ce qui concerne la variété indéfinie de précocité 00 le paramétrage proposé est basé sur les caractéristiques connues de ces variétés avec, en particulier, une floraison précoce et une faible sensibilité à la photopériode.

2. Paramètres phénologiques

. la sensibilité à la photopériode

Compte-tenu des résultats de l'analyse de sensibilité, nous avons travaillé sur le seuil photopériodique : faisant varier $N_{\text{uit max}}$ dans une fourchette compatible avec la latitude et la précocité des variétés (8.8 h - 9.5 h) par pas de 0.1, nous retenons la valeur qui minimise la somme des carrés des écarts entre les dates de floraison observées et les dates calculées (tableau 7, détails en annexe 3). Il s'agit là d'une technique d'optimisation classique, qui, comme le montrent SWANEY et al. (1986) et KENIG et al. (1987), peut permettre de caler l'ensemble des paramètres du modèle dans la mesure où l'on dispose d'un nombre suffisant d'observations.

En ce qui concerne le paramètre $D_{\text{urée max}}$, nous ferons l'hypothèse que l'intensité de la sensibilité à la photopériode pour les groupes I et II est semblable à ce qui est proposé pour le groupe III. En revanche, nous la réduirons de moitié pour la précocité 00 (ECOCHARD, 1986 - JONES et al., 1987).

source des données	nombre de graines/gousse
Blanchet et al. (1986)	172-16 : 2.37
Blanchet et al. (1987)	Kingsoy : 1.91 172-16 : 2.17
Mesures INRA Toulouse (1987)	Weber : 2.22 172-16 : 2.08
Mesures CETIOM Montélimar (1987)	Weber : 2.21 Kingsoy : 1.98 172-16 : 1.95
Mesures CETIOM Dijon	Maple Arrow (00) : 2.04

Tableau 8

. cycle reproducteur

Les schémas 7 et 22 (chapitre A), nous ont permis de rétablir les stades phénologiques de SOYGRO sous la forme d'observations classiques. Le stade ENDSET, en particulier, peut être obtenu à partir de R5 ou de R6 : R5 + 2 jours ou R6 - 8 jours. Le découpage du cycle, ainsi calculé (voir annexe 4) diffère sensiblement des valeurs proposées par les auteurs du modèle :

- pour les variétés à croissance indéterminée (Weber, Kingsoy), la croissance végétative s'arrête plus tôt et la phase de mise en place des organes dure plus longtemps.

- pour la variété déterminée (INRA 172-16), les gousses apparaissent un peu avant l'arrêt de la croissance végétative et la phase de remplissage du grain est plus longue.

La durée du cycle reproducteur est établie à partir des paramètres Nuit max et Durée max ajustés précédemment, et donc intègre la sensibilité photopériodique. On notera que ce paramètre varie peu d'une variété à l'autre, autour d'une valeur moyenne de 16 (UPT).

. maturation

Bien que la durée de maturation n'ait aucune influence sur le rendement, il est important de connaître, avec une bonne approximation, la date de récolte. Compte-tenu du faible nombre de données disponibles pour chacune des variétés (voir annexe 4), il semble préférable de retenir une valeur moyenne pour toute les variétés : 5.5 (UT).

3. Paramètres d'élaboration du rendement

Nous avons travaillé sur la mise en place des organes reproducteurs et sur leur croissance.

. mise en place

En ce qui concerne les gousses, le paramètre PODVAR correspond aux organes initiés et non aux organes finaux, c'est à dire au potentiel floral, pour lequel PUECH et al. (1986) donnent des valeurs de l'ordre de 4.5 gousses par plante et par jour pour une densité de 15 plantes/m². Par ailleurs, le seuil de compétitivité inter-plante serait atteint pour des densités de l'ordre de 40 plantes/m² (PRUDON et al., 1986). Un calcul rapide aboutit à une valeur de PODVAR de : $4.5 \times 40 = 180$ gousses/m²/jour. En outre, ce paramètre est considéré comme stable entre les variétés (PUECH et al., 1986).

La mise en place des graines est également liée à la définition du nombre moyen de graines par gousse (SDPDVR). On notera, que ce paramètre qui correspond à l'une des composantes du rendement reste donc stable quelles que soient les conditions de stress de la culture. Cette hypothèse de fonctionnement est, par ailleurs justifiée expérimentalement (MERRIEN, 1987). Les références bibliographiques et expérimentales (tableau 8) nous conduisent à retenir les valeurs moyennes suivantes : 2.21 pour Weber, 1.94 pour Kingsoy, 2.14 pour 172-16 et 2.04 pour la variété 00.

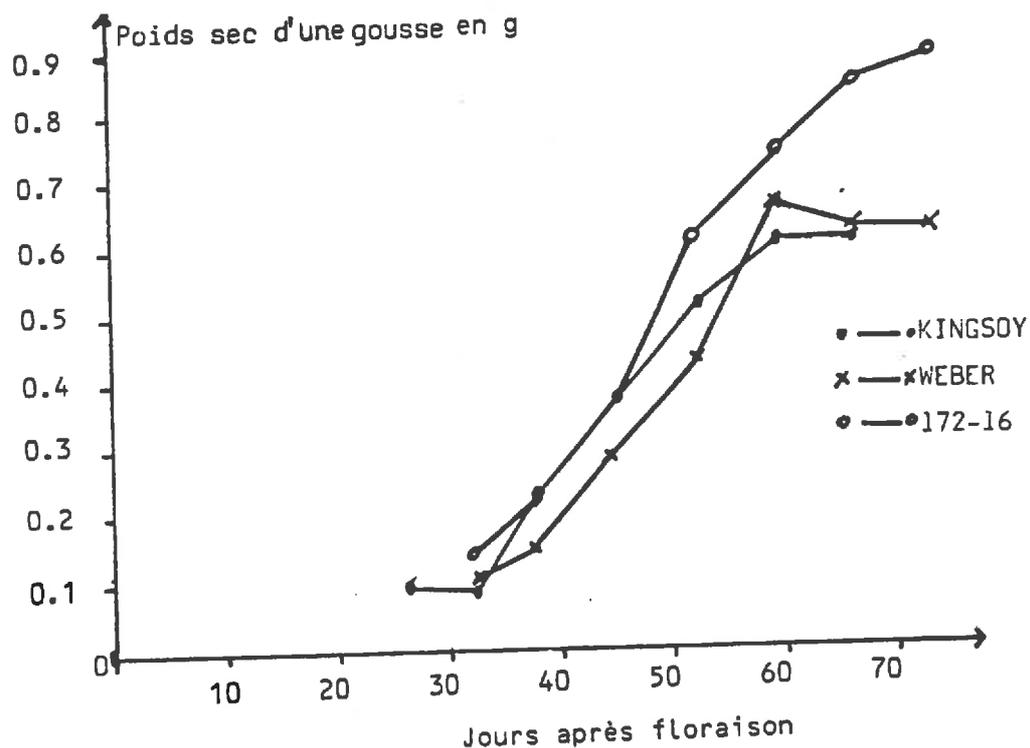


Figure 29 Croissance d'une gousse

VARIETE	CROISSANCE GOUSSE ENTRE R6-R7	NOMBRE GR/GOUSSE	CROISSANCE GRAINE EN MG/JOUR	CROISSANCE DE LA COSSE MG/JOUR (1)
WEBER	13.5	2.21	6.1	12.2
KINGSOY	11.3	1.98	5.7	11.4
172-72	14.6	1.95	7.5	15.0

(1) croissance de la cosse : 2*croissance graine

Tableau 9 : AJUSTEMENT DES PARAMETRES DE CROISSANCE DES ORGANES FRUCTIFERES

. croissance

On trouve peu de référence sur la cinétique de croissance des variétés choisies, c'est pourquoi nous avons réalisé, en collaboration avec l'équipe technique de la station du CETIOM à Montélimar, des prélèvements réguliers d'organes afin d'approcher la vitesse de croissance de la graine et de la cosse.

protocole : pendant la phase de remplissage des grains (R4-R7), prélèvement de 10 gousses par variété sur 10 plantes différentes toute les semaines (soit 7 prélèvements). Le niveau de prélèvement est identique à chaque passage : 3ème avant dernier noeud pour les indéterminés et dernier noeud pour la variété déterminée. Les cultures bénéficiaient d'une alimentation hydrique optimale.

résultats : le graphique 29 montre que la croissance de la variété déterminée est globalement plus importante que celle des variétés indéterminées.

exploitation des résultats : La croissance de la gousse (cosse + graines), ainsi que la croissance de la graine (PIGEAIRE, 1984) obéissent à une loi logistique classique. Par ailleurs, pendant la phase R6-R7, seul le poids des graines augmente, l'enveloppe ayant achevé sa croissance. Compte-tenu de ces remarques, nous avons calculé le paramètre SDVAR de la façon suivante (tableau 9) :

- ajustement logistique des courbes expérimentales (voir annexe 5)
- interpolation linéaire entre R6 et R7
- pondération par le nombre de grains par gousse.

Nous avons estimé la croissance de la cosse au double de celle de la graine (WILKERSON et al., 1985 - JONES et al., 1987).

4. Paramètres foliaires

Les valeurs proposées proviennent de divers essais :

- INRA-Auzeville 1986
- INRA-Auzeville 1987
- CETIOM-Montélimar 1987

Nos essais de validation, regroupés au chapitre E, nous ont conduit à travailler sur une variété très proche de Kingsoy : la variété Kador. Nous avons supposé qu'elle se comportait comme Kingsoy, sauf pour le paramètre de surface spécifique que nous avons pu mesurer expérimentalement (250 cm²/g).

De plus, nous tenons à rappeler que les valeurs correspondant à la variété de précocité 00 n'ont, pour la plupart, aucune réalité expérimentale, il s'agit de valeurs moyennes probables.

2ème PARTIE

MODELISATION DU FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DE LA CULTURE DANS SON MILIEU PEDOCLIMATIQUE

Les effets des contraintes hydriques perturbent différentes fonctions physiologiques de la plante et se répercutent ensuite sur le rendement et ses composantes. Ces effets ont fait l'objet d'un grand nombre de travaux, à partir desquels RITCHIE (1985) a proposé un modèle intégré dans la plupart des modèles de simulation de culture, et en particulier dans SOYGRO.

La mise en évidence d'un certain nombre de points critiques et la difficulté d'utiliser ce modèle dans les conditions pédoclimatiques françaises nous ont amené à élaborer un modèle original, qui peut être substitué au modèle de RITCHIE dans le modèle SOYGRO.

Dans un premier chapitre, nous présentons une analyse bibliographique des effets des contraintes hydriques sur le soja et leur modélisation, en prenant comme exemple le modèle de RITCHIE. La présentation détaillée de notre modèle fera l'objet du second chapitre.

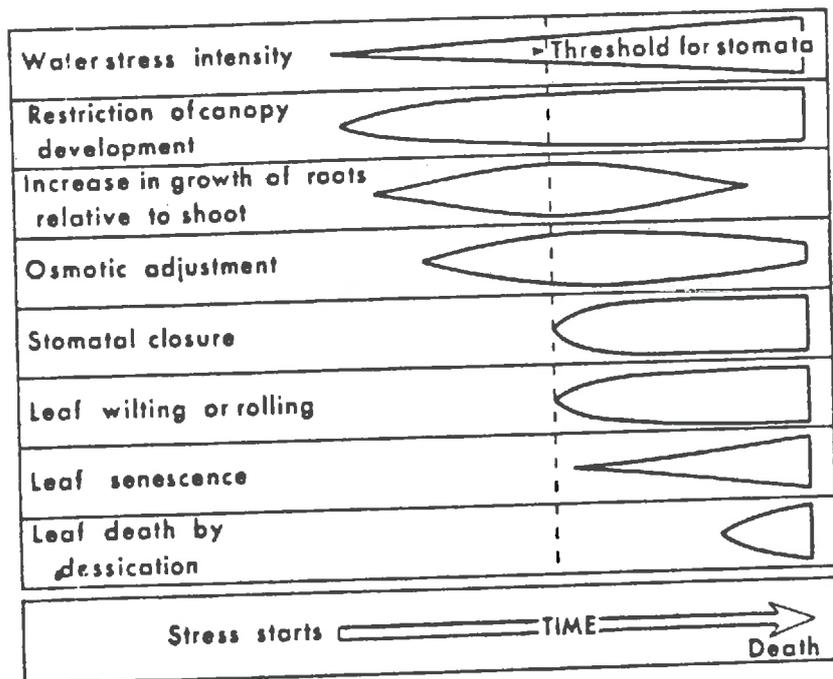


Figure 30 Réponse des diverses fonctions physiologiques à un stress hydrique modéré
D'après Bradford et Hsiao, 1982

C GENERALITES SUR LE FONCTIONNEMENT HYDRIQUE D'UNE CULTURE DE SOJA ET SA MODELISATION

La connaissance du comportement de la culture en réponse à une contrainte hydrique a conduit de nombreux auteurs à définir des fonctions de stress, qui sont ensuite utilisées dans les modèles de production. Nous analyserons, en particulier, le mode de calcul de ces fonctions dans le cas des modèles de simulation de culture.

I. LES EFFETS D'UNE CONTRAINTE HYDRIQUE.

1. sur les fonctions physiologiques de la plante

La réponse des diverses fonctions physiologiques de la plante au stress hydrique est illustrée par le schéma 30 proposé par BRADFORD et HSIAO (1982). La plante réagit rapidement en modifiant son cycle de développement par des stimuli hormonaux, en favorisant la croissance racinaire, en diminuant la turgescence de ses cellules afin d'ajuster le potentiel foliaire au potentiel du sol devenu limitant. C'est ensuite, seulement, que la transpiration sera affectée par fermeture des stomates et accélération de la sénescence; ce qui va diminuer globalement la photosynthèse (diminution des surfaces d'échange et de l'intensité de ces échanges) et la croissance du feuillage.

A ce schéma général, il faut ajouter, pour le soja et pour toutes les Légumineuses, une perturbation de la fixation symbiotique et, par conséquent, de l'alimentation azotée (EGLI et al, 1983; BOUNIOLS et al., 1986). Ce point est illustré par le graphique 27 (fin de première partie).

. effet du stress sur le développement

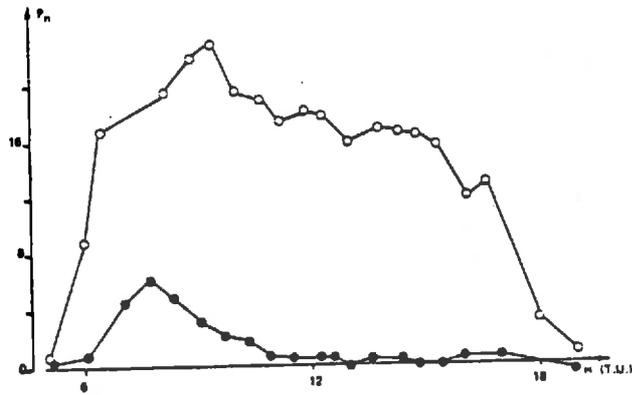
Les effets sont assez mal connus.

Les stress légers auraient tendance à accélérer le cycle, ce qui correspond à l'accélération du "calendrier physiologique" résultant de l'élévation de température des feuilles par suite de la fermeture des stomates (+3 à +5°C d'après SEGUIN, com. pers.). D'après BRADFORD et HSIAO (1982) ainsi que EVANS (1984), le stress hydrique entraîne des perturbations hormonales qui se traduisent par une fructification précoce.

Par contre, un stress hydrique sévère provoque le ralentissement, voire l'arrêt du développement (HODGES et FRENCH, 1985).

. distribution des assimilats en faveur des racines

Sous l'effet d'une contrainte hydrique, la distribution des assimilats est modifiée au profit des racines. Ainsi, PLANCHON et al (1986) ont mesuré la translocation des assimilats vers les racines en condition de stress et ont obtenu un quasi-double-



Influence d'une contrainte hydrique sur la photosynthèse nette P_N (mg de CO_2 $dm^{-2}h^{-1}$) au cours d'une journée ensoleillée, (○), témoin ; (●), déficit hydrique.

Figure 31 D'après Planchon et al, 1986

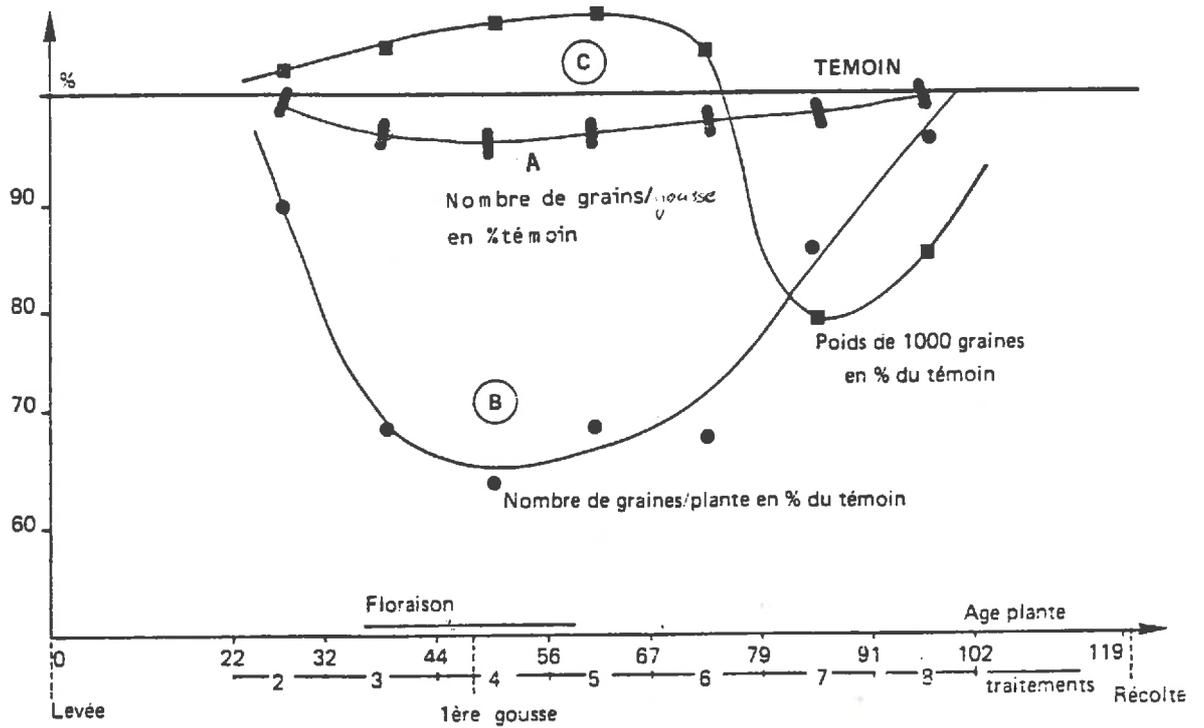


Figure 32 Evolution au cours du temps de la sensibilité du soja à la sécheresse (PUECH et BOUNIOLS, 1986 ; MERRIEN, 1987) :

ment de celle-ci. Il est probable que ce flux d'assimilats supplémentaire assure en priorité l'"entretien" des racines qui chez le soja est exigeant compte-tenu de la présence des nodules (MERRIEN, com. pers.).

. effets conjugués du stress sur la transpiration, l'expansion foliaire et la photosynthèse

La réduction de transpiration et d'expansion foliaire induites par un stress hydrique sont selon MEYER et GREEN (1981) équivalentes; tandis que les résultats de ROSENTHAL et al (1985) tendent à montrer que l'expansion foliaire (ou la turgescence) répond plus vite que la transpiration.

En fait, l'expansion foliaire est un indicateur difficile à interpréter car il intègre l'ensemble des réponses physiologiques au stress. De plus, suivant la méthode de mesure, la sénescence peut ne pas être prise en compte : croissance d'une feuille (MEYER et GREEN, 1981) ou de l'ensemble du feuillage d'une plante (ROSENTHAL et al, 1985).

La réduction de photosynthèse résultante peut être importante, comme le montre la figure 31.

2. sur les résultats agronomiques

Les effets que nous venons d'énoncer se traduisent par une réduction globale du rendement.

Dans une première approche, il est possible de mettre en évidence une relation simple, souvent linéaire, entre la production d'une espèce et la satisfaction de ses besoins en eau (PUECH et CABELGUENNE, 1986; MERRIEN, 1987). Mais cette évaluation globale du déficit hydrique sur l'ensemble du cycle s'avère rapidement insuffisante pour bien comprendre le phénomène, puisque le rendement va être plus ou moins affecté selon l'état de développement de la culture lors de la contrainte (SIONIT et KRAMER, 1977; ECK et al., 1987).

Certains auteurs (SUDAR et al, 1981; PUECH et BOUNIOLS, 1986) proposent des courbes de sensibilité du rendement à la contrainte hydrique en fonction de l'âge de la culture (figure 32). Ainsi, une contrainte appliquée pendant le remplissage de la graine peut provoquer jusqu'à 50% de pertes de rendement, alors que pour la même contrainte appliquée avant la floraison, la perte ne sera que de 20%. En effet, une contrainte précoce affecte surtout l'appareil végétatif et donc la fonction assimilatrice qui, à ce moment là, est à même de se renouveler. En revanche une contrainte tardive touche le feuillage de façon irréversible et réduit le nombre de gousses qui se mettent en place.

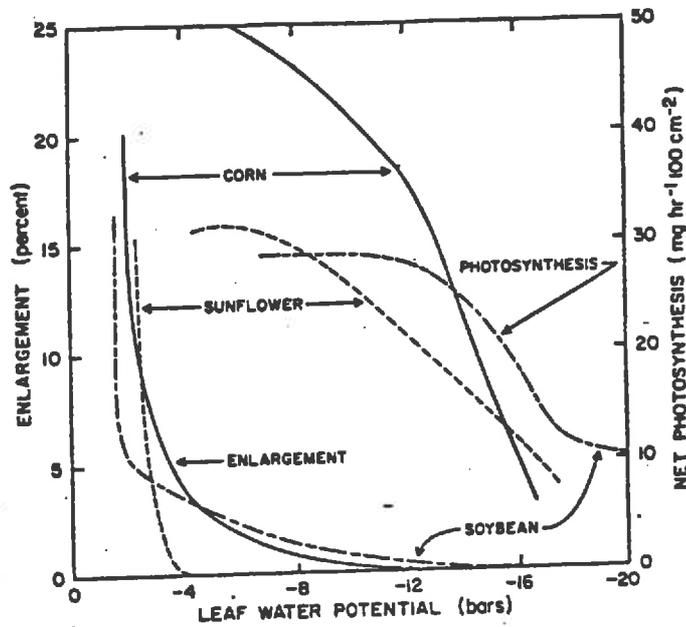
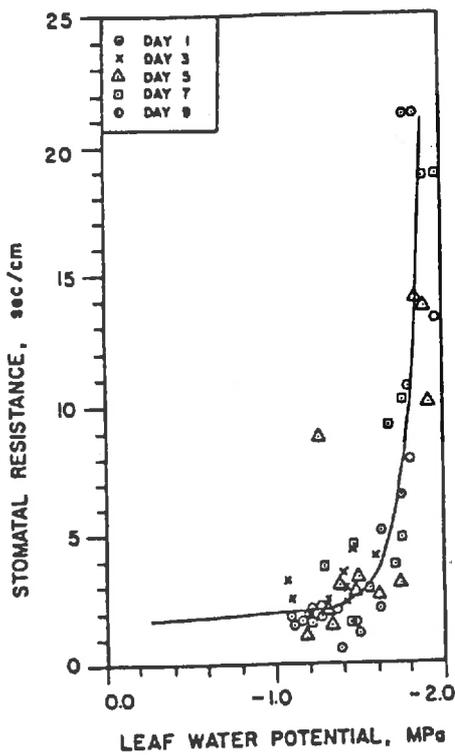


Fig.3. The relation of leaf enlargement and net photosynthesis to the leaf water potential for 3 crops as measured in a growth chamber (after Boyer, 1971).

Figure 33a Tirée de Boyer, 1970

Influence d'une contrainte hydrique sur l'expansion foliaire et sur la photosynthèse

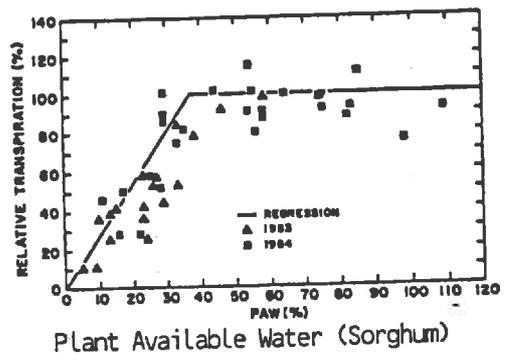
Relation résistance stomatique
potentiel foliaire



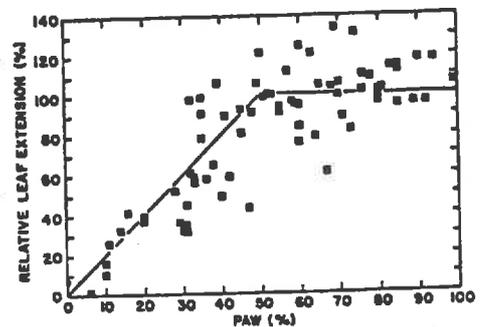
Experimental relationship between stomatal resistance and total leaf water potential for Exp. II. The theoretical relationship described by Eq. [3] to [5] is also shown by the solid line.

Figure 33b Tirée de Zur et al, 1983

Relations entre transpiration et
expansion et eau utile



Plant Available Water (Sorghum)



Plant Available Water (Sorghum)

Figure 33c Tirée de Rosenthal et al, 1985

L'analyse séparée des différentes composantes du rendement (PUECH et BOUNIOLS, 1986; ECK et al., 1987; MERRIEN, 1987) montre que le stress va pénaliser la production d'organes fructifères lorsqu'il se produira pendant la floraison; en même temps une légère compensation va s'opérer par augmentation du poids de la graine. Il affectera le poids de 1000 grains s'il survient pendant le grossissement du grain. Par contre, le nombre de grains par gousse semble être la composante la moins sensible au stress hydrique (figure 32).

Un modèle de simulation de culture devra intégrer l'ensemble de ces informations pour être capable de reproduire avec réalisme les effets du stress hydrique, en introduisant des fonctions permettant de quantifier les effets résultant sur les différents facteurs.

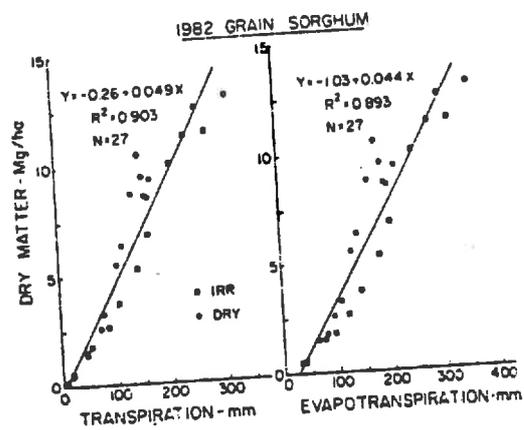
II. FONCTIONS DE STRESS HYDRIQUE

Une fonction de stress hydrique permet de quantifier la réduction de production globale ou le ralentissement d'une fonction physiologique, induits par une contrainte hydrique. Il s'agit donc d'une fonction de réduction, prenant des valeurs de 0 à 1, calculable à un pas de temps allant de la journée à l'ensemble de la saison culturale. Elle est définie en fonction d'un indicateur de stress, accessible par la mesure ou par le calcul tel que :

- la réserve en eau du sol
- le potentiel foliaire
- la température de surface du végétal

.....
Certains de ces indicateurs, tel que la température de surface, sont difficiles à utiliser car ils varient au cours de la journée. Des auteurs se sont attachés à définir expérimentalement ces fonctions de stress (figures 33) et l'on s'aperçoit que les courbes de réponse présentées ont toujours la même forme, même si les seuils de sensibilité varient (RITCHIE, 1981).

Comme le montrent les figures 33, on ne peut prétendre caractériser toutes les fonctions physiologiques avec la même fonction de stress, pourtant la fonction de stress de transpiration, TP/TP₀, ou d'évapotranspiration, ET/ETP apparaît comme une référence (synthèse bibliographique de JONES et SMAJSTRLA, 1980) ou, tout au moins, une première approximation de la mesure de la contrainte hydrique. Elle présente l'avantage de pouvoir être calculée à des pas de temps variables et, par suite, de s'intégrer facilement dans tous les types de modèle. Même dans ce contexte simplificateur, il reste le problème de savoir laquelle de ces deux fonctions, TP/TP₀ ou ET/ETP, adopter de préférence.



Dry matter production in relation to estimated transpiration and evapotranspiration for the 1982 grain sorghum.

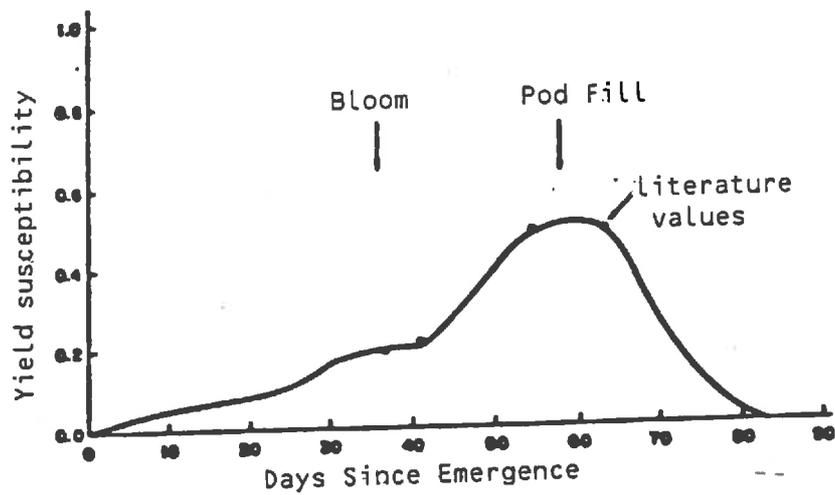
Figure 34 Tirée de Howel et Musick, 1984

Production de matière sèche en fonction de la transpiration ou de l'évapotranspiration

D'un point de vue strictement physiologique, c'est bien la réduction de la transpiration par rapport à son niveau maximal qui renseigne sur l'état de stress de la plante et, par suite indique la réduction de rendement (HANKS, 1974). Néanmoins, comme les valeurs d'évapotranspiration sont plus faciles d'accès au niveau de la mesure, de nombreux auteurs approximent TP/TPO par ET/ETP.

Dans la mesure où l'on intègre des valeurs d'évapotranspiration sur l'ensemble du cycle, la part strictement évaporative du sol influe peu sur le rapport ET/ETP. Ainsi, HOWELL et MUSICK (1984) montrent que l'erreur commise n'influence pas la qualité de la corrélation linéaire existant entre production et stress hydrique (figure 34). Par contre, les coefficients d'ajustement dépendent de la fonction choisie, TP/TPO ou ET/ETP. De même, lorsque ET/ETP est utilisée à la place de T/TP à un pas de temps de l'ordre de la journée, il s'agit toujours de culture couvrante (LAI > 3 en général); de sorte que l'évaporation du sol peut, là aussi, être négligée.

On retiendra donc que, dans le cadre d'une étude simplifiée, la fonction de stress à prendre en considération est TP/TPO mais qu'on peut lui substituer, sans commettre une grosse erreur, le rapport ET/ETP quand la culture est couvrante ou lorsque l'on travaille à l'échelle de l'ensemble du cycle.



Yield susceptibility relationship for soybeans
 Sensibilité du rendement au stress hydrique
 Figure 35 Tirée de Sudar et al, 1981

Ces fonctions de stress peuvent être utilisées

- soit globalement au niveau du rendement : on confronte un facteur à expliquer, le rendement, à un facteur explicatif, le stress hydrique (MERRIEN, 1987). Compte-tenu de la forte influence du stade de développement de la culture au moment où intervient le stress, de nombreux auteurs travaillent par phases de sensibilité (JONES et SMAJSTRLA, 1980). C'est ainsi que la FAO (1986) propose pour de nombreuses cultures des relations,

$$\left(1 - \frac{\text{Rendement}}{\text{Rendement potentiel}} \right) = \text{CR} \times \left(1 - \frac{\text{ET}}{\text{ETP}} \right)$$

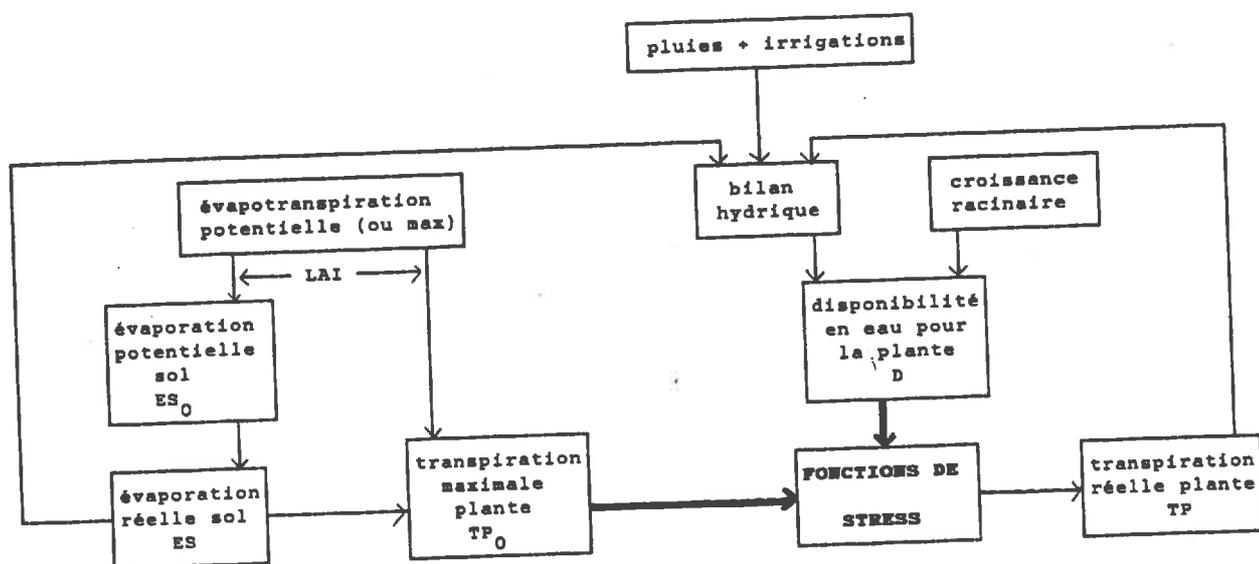
où CR diffère selon la période de stress, comme l'illustre l'exemple du soja: CR=0.85 pour un stress réparti de façon homogène sur l'ensemble du cycle de culture (valeur confirmée par MERRIEN, 1987).
CR=0.20 pendant la phase végétative
CR=0.80 pendant la floraison
CR=1.00 pendant la phase d'élaboration du rendement.

Pour intégrer cette sensibilité différentielle des phases de développement dans une fonction de stress synthétique, certains auteurs (HILER et CLARK, 1971 - SUDAR et al., 1981) définissent une fonction de sensibilité (figure 35). Dans ce cas, la fonction de stress correspond à $(\sum_1^n \text{CSi} * \text{SDi})$ où CSi et SDi sont respectivement l'indice de sensibilité et l'indice de stress du jour i.

- soit à des pas de temps beaucoup plus fins : c'est le cas des modèles de simulation de croissance et de développement, qui fonctionnent généralement à un pas de temps journalier (ce qui ne permet plus de confondre TP/TPO avec ET/ETP, surtout pour simuler le début de la vie de la plante).

Comme nous l'avons vu précédemment, toutes les fonctions physiologiques ne vont pas réagir en même temps au stress. Le principe adopté dans les modèles de simulation de culture est de définir 2 (ou 3) fonctions de stress correspondant à 2 (ou 3) familles de fonctions physiologiques proches par leur degré de sensibilité au manque d'eau.

Ainsi, dans SOYGRO, sont définis trois fonctions de stress : le stress de "turgescence", le stress de "transpiration" et le stress racinaire. Le premier affecte la vitesse de développement, la répartition des assimilats et la croissance en surface des feuilles, le second affecte la photosynthèse, la sénescence et la croissance en masse des racines tandis que le troisième affecte la progression et le profil de densité racinaires.



Organigramme du compartiment stress hydrique

Figure 36

III PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DU COMPARTIMENT BILAN HYDRIQUE DES MODELES DE SIMULATION DE CULTURE (type SOYGRO), UN EXEMPLE : LE MODELE DE RITCHIE.

1. Principes de fonctionnement

Comme le montre l'organigramme reproduit figure 36, besoins en eau de la culture (transpiration maximale) et disponibilité en eau pour le système racinaire sont calculés en parallèle et, c'est le rapport disponibilité/transpiration maximale qui définit les fonctions de stress. En fonction de l'indice foliaire, l'ETP est décomposée en une demande propre au milieu sol et une demande spécifique à la plante. Parallèlement, un modèle de croissance racinaire calcule un facteur de densité racinaire, qui va contribuer à exploiter la réserve en eau du sol (bilan hydrique), définissant ainsi la disponibilité.

Le calcul des fonctions de stress à un pas de temps journalier, du début à la fin de la vie de la plante, nécessite d'introduire des phénomènes qui ne sont pas forcément pris en compte dans des bilans hydriques classiques, et en particulier la séparation entre évaporation et transpiration.

Cette séparation s'effectue selon les modalités suivantes :

- au niveau du sol nu, définition d'une évaporation potentielle ES_0 . Sous un couvert végétal, deux phénomènes contribuent à la réduction de ES_0 par rapport à ETP :

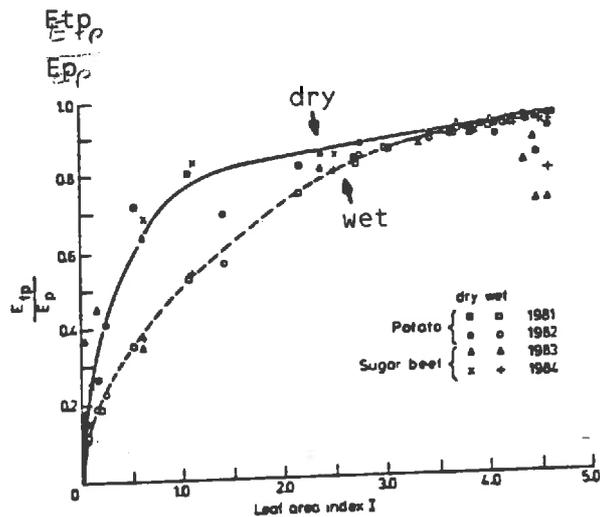
. l'énergie disponible au niveau du sol est limitée par la couverture foliaire selon une loi qui, dans une première approximation, peut être considérée comme une loi de Beer semblable à celle introduite dans le calcul de la photosynthèse :

$$RNsol = RN \exp - \delta_{es} lai$$

où $RNsol$ est le rayonnement net au niveau du sol
 RN le rayonnement net au dessus du couvert
 δ_{es} est un coefficient d'extinction analogue à δ_{ep}

RITCHIE (1972) a ajusté expérimentalement le coefficient δ_{es} à 0.4 à partir de données de diverses cultures (sorgho, coton, maïs, soja).

. les phénomènes de convection au niveau du sol nu sont négligeables quand le feuillage devient important. Cela se traduit par une fonction de réduction du terme convectif de l'ETP par rapport au LAI, semblable (JONES et al., 1986) ou différente (RITCHIE, 1985b) de la fonction précédente.



Potential transpiration E_{tp} over potential evapotranspiration E_p ($= E_{max} - E_i$) as a function of leaf area index I when either the soil surface is wetted every day or the soil surface is dry most of the time

Transpiration potentielle / évapotranspiration potentielle en fonction du LAI et de l'état de sécheresse du sol en surface

Figure 37 Tirée de Feddes, 1987

- A partir de cette évaporation potentielle, l'évaporation réelle du sol nu, après un épisode pluvieux ou une irrigation, est modélisée en deux phases (RITCHIE, 1972; PERRIER, 1973):

. pendant la phase 1, le sol évapore à l'évaporation potentielle. Lorsque le cumul de l'évaporation atteint un seuil, qui dépend du type de sol, se crée le mulch et commence la phase 2.

. pendant la phase 2, l'évaporation du sol dépend de la teneur en eau de la couche de surface et des propriétés hydrodynamiques du sol. Il y a, alors, réduction de ES par rapport à ES_0 , qui chez RITCHIE comme chez d'autres auteurs (KANEMASU et al., 1976 ; TANNER et al., 1976; AL-KHAFAF et al., 1978) est paramétrée en fonction du temps ($\Sigma ES = \alpha \sqrt{t}$).

- Au niveau du couvert végétal, définition d'une transpiration potentielle de la plante TP_0 . Celle-ci n'est pas indépendante de l'état hydrique du sol en surface (DENMEAD, 1970; ARKIN et al, 1974; RITCHIE, 1983; FEDDES, 1985 et 1987;), en raison des phénomènes d'advection à l'échelle très fine (CHOUDHURY et MONTEITH, 1988). Ainsi, la figure 37 montre que :

TP_0 sol sec > TP_0 sol humide, pour un LAI inférieur à 3.

Selon les auteurs, le rapport TP_0 sol sec / TP_0 sol humide peut varier de 1.1 (DENMEAD, 1970) à 1.5 voire 2 (FEDDES, 1985; RITCHIE, 1985a). En fait, l'indice foliaire ne permet pas d'expliquer l'ensemble du phénomène, il faut également tenir compte de la régularité de l'espacement entre les plantes et de l'orientation des feuilles (DENMEAD, 1970).

Le stress hydrique de la plante, traduit entre autre par le rapport TP/TP_0 , est régulé par la disponibilité (D) en eau qui doit tenir compte de l'état hydrique du sol (bilan hydrique) et de la capacité de la plante à extraire cette eau par son système racinaire. Le calcul procède soit d'une modélisation de type "flux" (CHILDS et al., 1977; RITCHIE, 1985b; van KEULEN et SELIGMAN, 1986; PROTOPAPAS et BRAS, 1988), soit d'une modélisation de type "réservoir" (RITCHIE, 1972; voir D). Dans le premier cas D est homogène à la transpiration (un flux), dans le second cas D est homogène à une réserve en eau.

Le bilan hydrique permet d'évaluer la réserve en eau du sol, selon une formulation classique :

$$RES_{j+1} = RES_j + PI - ES - TP - Dr - Rui$$

où RES_j est la réserve du jour j, PI sont les apports d'eau, Dr, le drainage et Rui, le ruissellement.

VALEUR MOYENNE DE RESERVE UTILE
 (mm par cm de sol)
 SELON LES TEXTURES DE LA LEGENDE FAO

TEXTURE	USA	FRANCE	UK Subsoil	UK Topsoil
Grossière	0.70	0.80	1.20	1.10
Moyenne	1.40	1.50	1.70	2.10
Moyenne fine	1.80	1.85	1.90	2.40
Fine	1.20	1.75	1.40	2.00
Très fine	1.25	1.70	1.40	1.90

Tableau 10 tirée de King et Daroussin, 1988

Il faut noter qu'un problème important dans les validations de bilan hydrique concerne l'évaluation des humidités caractéristiques du sol et de sa réserve utile. En effet, celle-ci est définie par : $ruu = (H_{cc} - H_{pfp}) \times \rho_s$ en mm/cm de sol, où H_{cc} et H_{pfp} sont les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, et ρ_s la densité apparente du sol. Dans cette définition ruu est une réserve unitaire qui ne dépend que du type de sol.

Or, de nombreux auteurs (MAERTENS et CABELGUENNE, 1974; RITCHIE, 1981) ont montré que les humidités caractéristiques d'un sol mesurées au laboratoire, définissent mal l'eau réellement disponible pour la culture. Cela est dû à la conjugaison de plusieurs phénomènes non pris en compte par l'approche standardisée du laboratoire :

- . la disponibilité en eau est fonction de la densité de racines présentes au niveau considéré, qui est liée à l'architecture du système racinaire de la plante.
- . certaines espèces sont capables d'extraire l'eau au delà du potentiel seuil fixé par le pF 4.2. RATLIFF et al (1983) ont mesuré in situ les humidités caractéristiques de nombreux types de sol et les ont comparées aux mesures de laboratoire, ils ont montré que la réserve maximale disponible pour la plante pouvait dépasser la ruu de l'ordre de 10% à 20%.
- . la constante de temps de drainage implique qu'une partie de l'eau, destinée à être évacuée du profil, est momentanément disponible pour la plante.

A cela s'ajoute le problème des normes des mesures de laboratoire qui varient d'un pays à l'autre (HALL et al., 1977; JAMAGNE et al., 1977; RAWLS et al., 1982). KING et DAROUSSIN (1988) montrent que les différences induites sur le calcul de la réserve utile sont loin d'être négligeables (tableau 10). Des mesures au champ semblent donc préférables aux analyses de laboratoire.

Les deux composantes de la croissance racinaire, en profondeur et en densité, sont essentielles à une bonne évaluation de la disponibilité en eau pour la plante. Le calcul de la profondeur du front racinaire fait, en général, intervenir une somme de températures (MASSE et al. 1988). Pour prendre en compte la densité racinaire, il faut se donner un profil empirique de densité racinaire, qui peut être très simple (HOUGLAND et al., 1981; MAERTENS, 1988).

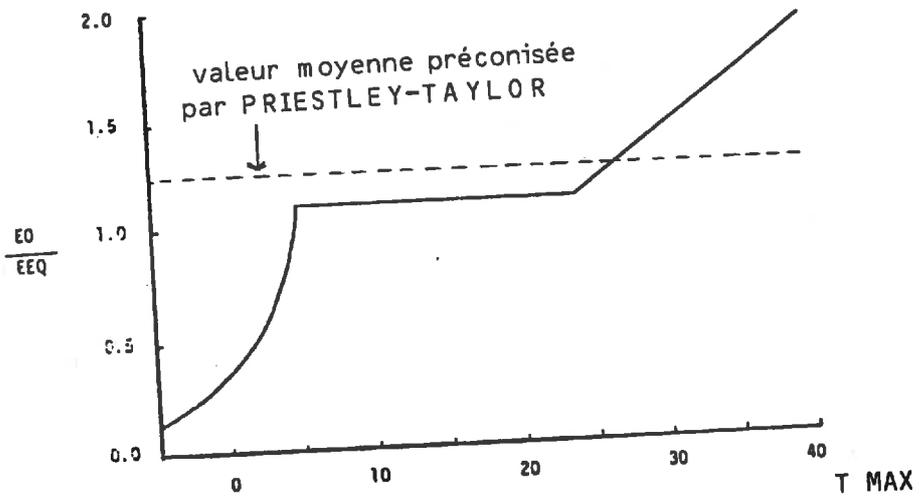


Figure 38 Introduction d'un terme convectif
(d'après RITCHIE, notice CERES-Wheat)

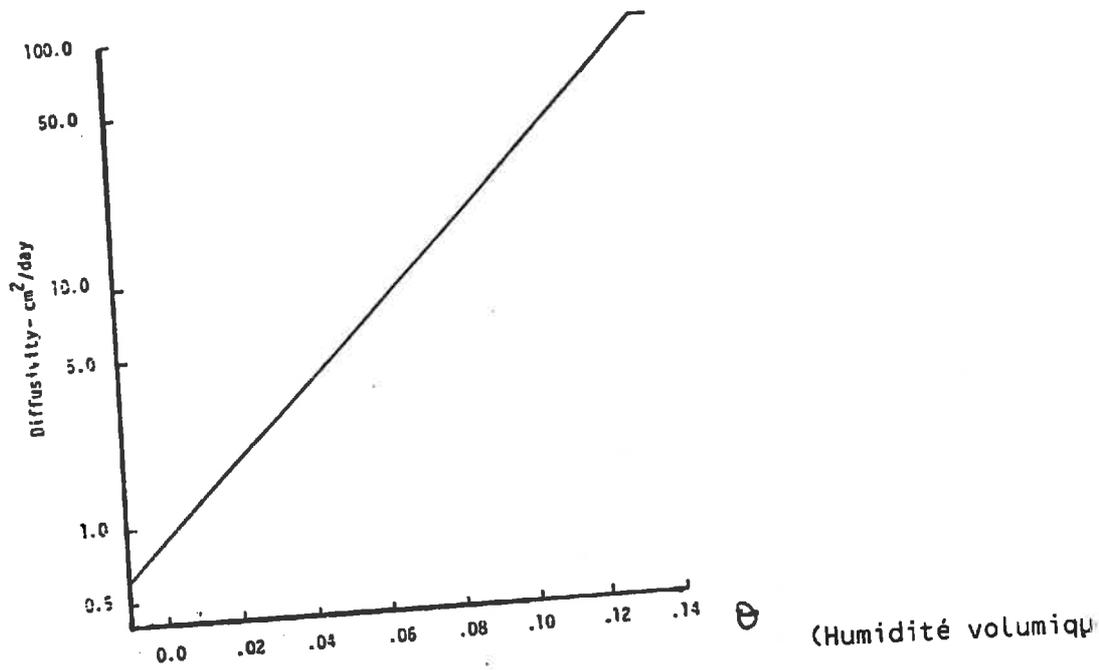


Figure 39 Fonction de diffusivité
(tirée de RITCHIE, notice CERES-Wheat)

2. Exemple du modèle de RITCHIE

Rappelons que le modèle de RITCHIE est actuellement incorporé dans la plupart des modèles de production : CERES-wheat (RITCHIE, 1985), CERES-maïs (JONES et al., 1986), AFRCWHEAT (PORTER, com. pers.), EPIC (WILLIAMS et al., 1984), SOYGRO.

. Fonctionnement du modèle

Le modèle de RITCHIE fonctionne sur le schéma précédemment décrit. L'objet de ce paragraphe est d'en donner les principales articulations, l'ensemble du modèle ayant été décrit plus finement par ailleurs (RITCHIE, 1985b; JONES et al., 1986).

L'ETP est estimée selon une méthode analogue à celle de PRIESTLEY-TAYLOR (1971) : $ETP = \tau \cdot EEQ$, où EEQ est l'évaporation à l'équilibre (équivalent au terme radiatif de Penman) et τ un facteur destiné à introduire l'effet de convection.

$$EEQ = RG (2.04 \cdot 10^{-4} - 1.83 \cdot 10^{-4} a) \times (TD + 29)$$

où RG : rayonnement global en $\text{cal/cm}^2/\text{jour}$
 a : albédo

$$TD = 60\% TMAX + 40\% TMIN \text{ (prise en compte de l'absence d'évaporation la nuit)}$$

Cette formulation de EEQ intègre deux formules empiriques : $RN = f(RG, a)$ et $P' = f(TD)$. L'albédo a est calculé en fonction de l'indice foliaire : $a = 0.23 - (0.23 - sa) \cdot \exp(-0.75 lai)$ et sa est l'albédo du sol nu. τ s'exprime en fonction de $TMAX$ selon le graphique 38. Les valeurs discontinues de τ et faibles par rapport à la moyenne préconisée par PRIESTLEY-TAYLOR n'ont, semble-t-il, qu'une réalité empirique (conditions d'advection locale, ...) et ne se justifient que si l'on utilise le formalisme de EEQ associé (PERRIER, SEGUIN, LAGOUARDE, com. pers.)

En ce qui concerne l'évaporation potentielle du sol,
ESO :
si $LAI < 1$ $ESO = ETP (1 - 0.43 \times LAI)$
si $LAI > 1$ $ESO = EEQ \times \exp(-0.4 LAI)$
Ainsi, le terme convectif de l'ETP est négligé à partir d'un LAI de 1.

L'évaporation réelle est calculée à partir de ES_0 de la façon suivante :

Pendant la phase 1, $ES (1) = ES_0$, jusqu'à ce que le cumul ΣES ait atteint le seuil U qui varie selon le type de sol de 6 à 9 mm (RITCHIE, 1972).
Pendant la phase 2, $\Sigma ES (2) = \alpha \sqrt{t}$, où t est le nombre de jours depuis le début de la phase 2 et α un coefficient qui théoriquement varie de 3.34 à 5.08 mm/ \sqrt{j} selon le type de sol (RITCHIE, 1972). Dans SOYGRO α est constant : 3.5 mm/ \sqrt{j} .
La réalimentation hydrique du mulch après de faibles pluies suit des relations expérimentales.

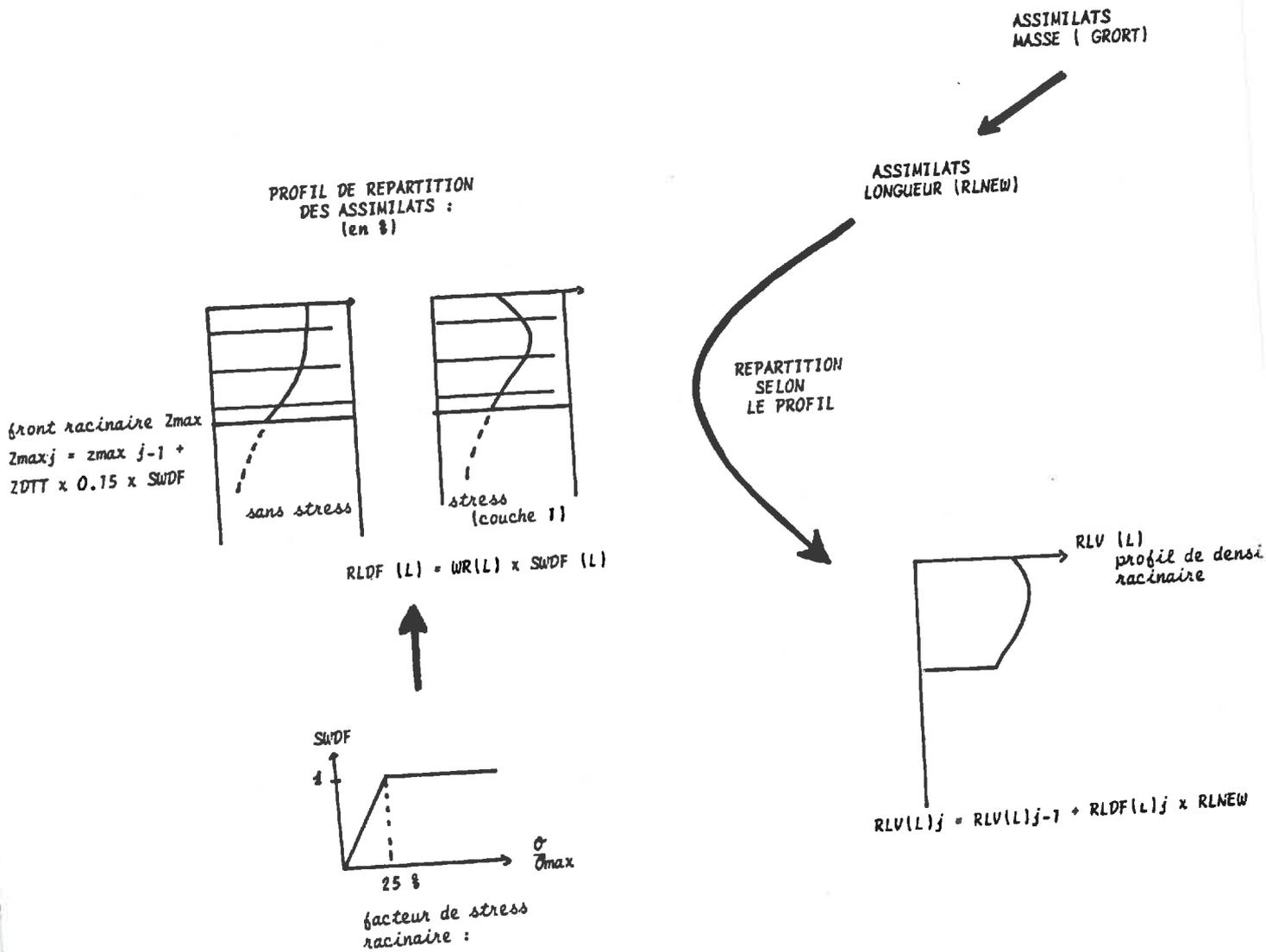


Figure 40 Croissance Racinaire
 (d'après Listing SOYGRO)

On accède à la transpiration maximale de la plante, TPO, par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \text{LAI} < 3 & \quad \text{TPO} = \text{ETP} \times (1 - \exp(-\text{LAI})) \\ \text{LAI} > 3 & \quad \text{TPO} = \text{ETP} - \text{ES} \end{aligned} \quad \text{et } \text{TPO} < \text{ETP} - \text{ES}$$

Le coefficient de l'exponentielle, ici de -1, est différent de celui utilisé pour calculer ESO (-0.4).

Le bilan hydrique fonctionne par couche et tient compte du ruissellement, du drainage et des remontées capillaires. Le ruissellement est calculé selon les abaques du Soil Conservation Service, USDA (WILLIAMS et al., 1984). Le calcul du drainage fait intervenir une constante de drainage identique pour l'ensemble du sol. Les remontées capillaires ne concernent que les 4 premières couches et nécessite l'introduction d'un coefficient de diffusion (fonction des humidités comparée des couches, figure 39)

Le fonctionnement du module de croissance racinaire est schématisée sur la figure 40 : une partie de la production aérienne d'assimilats est destinée aux racines (GRORT). Un facteur de longueur massique permet de transformer GRORT en longueur de racine (RLNEW) qui est ensuite répartie dans le profil selon le schéma RLDF(L), L étant le numéro de la couche. Ce schéma de répartition tient compte de :

- . la progression du front racinaire (ZMAX fonction de la température et du stress hydrique),
- . du type de système racinaire par le biais du profil de base WR(L) qui est une donnée d'entrée.
- . du stress hydrique.

On définit ainsi chaque jour un profil de densité racinaire, RLV(L).

L'absorption racinaire est définie par la formule suivante :

$$\text{ABS} = (\phi_r - \phi_s) / \text{rsr}$$

où $\phi_r - \phi_s$ = différence de potentiel entre le sol et les racines et rsr = résistance hydraulique à l'interface sol-racine.

Cette résistance est fonction de la distance moyenne entre deux racines (d), de la densité racinaire (RLV) et de la conductivité hydraulique ($k(\theta)$) :

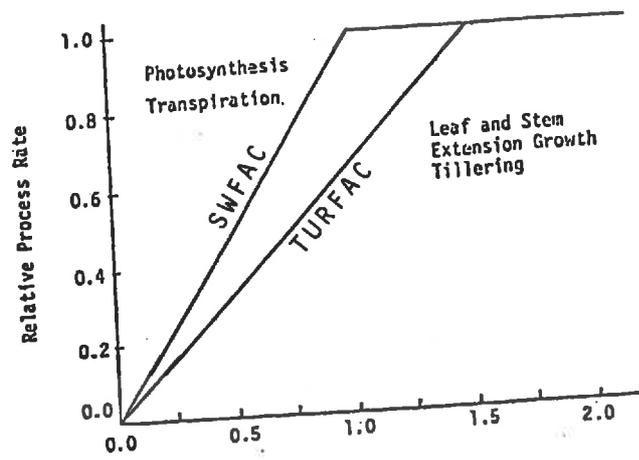
$$\text{rsr} = d / (\text{RLV} + k(\theta)) \quad (\text{VOLTZ et RAMBAL, 1987})$$

RITCHIE (1985 b) fixe un certain nombre de ces variables, se donne une relation $K(\theta)$ et aboutit à la formulation suivante de l'absorption racinaire (ABS(L)) :

$$\text{ABS}(L) = \frac{2.67 \cdot 10^{-3} \exp(62 \theta(L))}{6.68 - \log(\text{RLV}(L))}$$

La transpiration réelle, TP, correspond à la valeur minimum entre $D = \sum \text{ABS}(L)$ et TPO.

Les fonctions de stress résultent de l'adéquation entre la demande évaporative, TP₀, et l'offre D (figure 41 au verso).



$$\frac{Q_{max}}{T_{max}} \frac{\text{Disponible en eau}}{\text{Transpiration maximale}} = \frac{D}{T_0}$$

Figure 41 : Calcul des indices de stress hydrique (d'après RITCHIE, notice CERES-Wheat)

. Analyse critique

Le modèle de RITCHIE prend en compte l'ensemble des phénomènes physiques et biologiques liés à l'alimentation hydrique de la plante :

- . au niveau du sol : ruissellement, drainage, remontées capillaires,...
- . au niveau de la plante : croissance racinaire en fonction des assimilats fournis par les parties aériennes
- . à l'interface : absorption de l'eau par les racines.

Une version très récente permet également de modéliser la présence d'une nappe phréatique (J. JONES, com. pers.).

En contrepartie, la mise en oeuvre de ce modèle nécessite une description précise du sol discrétisé en plusieurs couches, adaptée à la banque de données sol de l'USDA et donc difficilement applicable à la nomenclature française. Il est toutefois possible de réduire les données d'entrée (JONES et al., 1986) à :

- . nombre de couches et profondeur de chacune d'elles
- . pour chaque couche - humidité à la capacité au champ
- humidité au point de flétrissement
- densité apparente ou porosité
- schéma de répartition des assimilats, $WR(L)$
- . paramètre de ruissellement
- . limite d'évaporation potentielle sol
- . albédo sol nu.

Les mêmes auteurs (JONES et al., 1987) proposent par ailleurs une relation entre $WR(L)$ et l'espèce, en l'absence d'observations in situ.

De plus, RITCHIE utilise des relations expérimentales qu'il serait nécessaire de vérifier dans nos conditions telles que :

- . l'estimation de l'ETP
- . la paramétrisation du calcul de ES en fonction du temps
- . les relations $ES_0=f(LAI)$ et $TPO=f(LAI)$
- . la réalimentation hydrique du mulch
- . la modélisation du ruissellement qui dépend des normes USDA
- . la relation diffusivité= $f(\text{teneur en eau})$ pour le calcul des remontées capillaires
- . la relation absorption = $f(\text{teneur en eau, densité racinaire})$

Parmi ces relations, nous avons analysé la méthode d'estimation de l'ETP.

Rappelons que chez RITCHIE, $ETP = \tau \cdot EEQ$ où EEQ est l'évaporation à l'équilibre (estimée de façon empirique) et τ est un coefficient (analogue à celui de PRIESTLEY-TAYLOR) qui pendant la période qui nous intéresse prend la valeur constante de 1.1. Cette formulation ne permet pas de prendre en compte la variabilité des phénomènes d'advection. Pour analyser l'impact de cette approximation, nous avons réalisé une étude comparative entre ETP RITCHIE et ETP Penman.

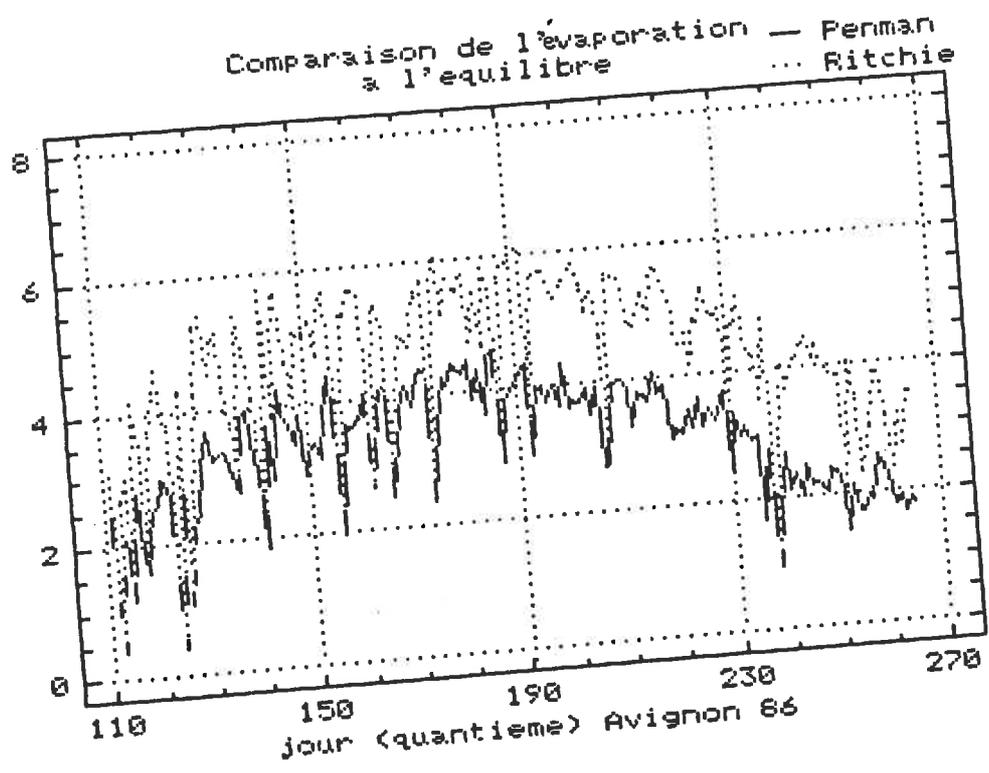


Figure 42a

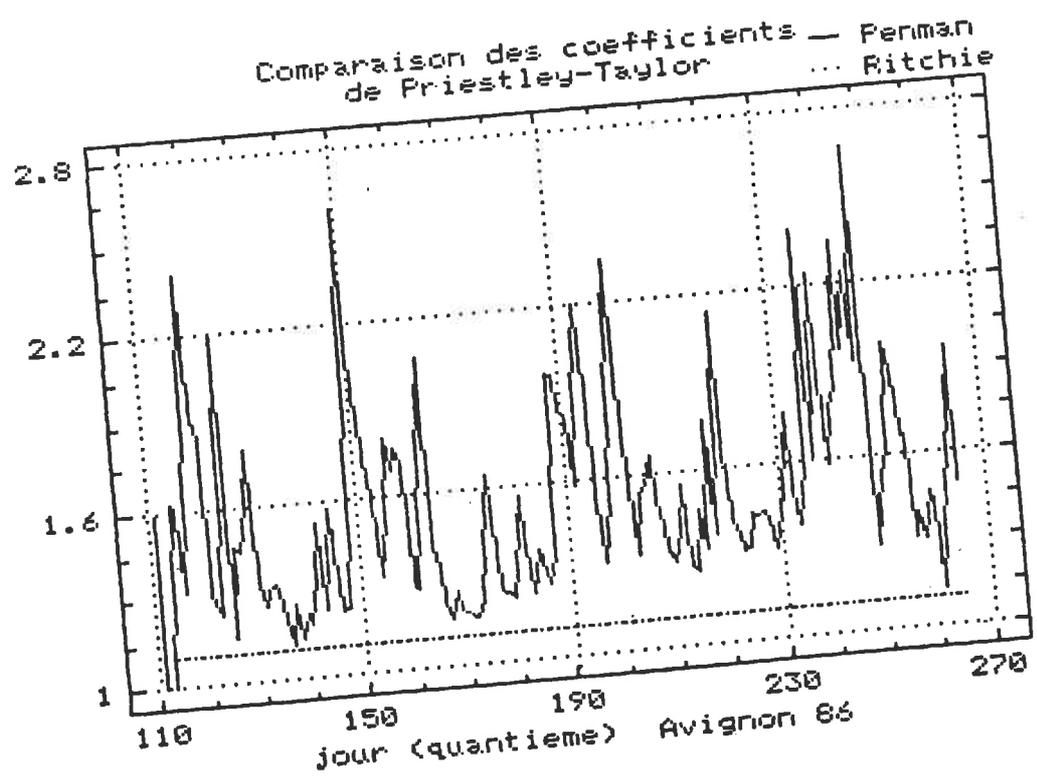


Figure 42b

La formule de Penman se décompose en un terme convectif et un terme radiatif qui correspond à l'évaporation à l'équilibre définie par PRIESTLEY-TAYLOR. On peut donc calculer EEQ Penman et en déduire un coefficient τ variable (SEGUIN, 1977) :

$$\begin{aligned} \text{EEQ (Penman)} &= \text{RN} * (\text{P}' / \text{P}' + \delta) \\ \tau \text{ (Penman)} &= \text{ETp (Penman)} / \text{EEQ (Penman)} \end{aligned}$$

La comparaison de ces valeurs avec celles proposées par RITCHIE (figures 42 a et b) montrent que :

- EEQ est surestimée par rapport à EEQ Penman (une analyse détaillée est proposée en annexe).
- τ est sousestimé par rapport à τ Penman

Il en résulte que le rapport Etp RITCHIE / Etp Penman oscille autour de 1 comme le montrent les figures 43 a et b. Cependant, même si en moyenne sur l'ensemble du cycle Etp RITCHIE est une bonne approximation de Etp Penman, son utilisation à un pas de temps plus court peut poser des problèmes, puisqu'elle sert à calculer une fonction de stress dont l'impact physiologique variera selon le stade de développement de la culture. Pour évaluer cet effet, nous avons effectué une simulation SOYGRO en introduisant l'ETP Penman dans le calcul du bilan hydrique tel qu'effectué par RITCHIE. Les résultats sont les suivants :

	TOULOUSE				AVIGNON			
	86		87		86		87	
	Ritchie	Penman	Ritchie	Penman	Ritchie	Penman	Ritchie	Penman
rendement	11.0	11.8	32.6	37.1	9.3	10.0	21.9	22.8
nb gousses/m ²	547	520	1047	1048	658	614	1067	1015
poids de 1000 g	91	103	141	160	64	74	93	102
matière sèche	274	278	690	760	346	350	541	553

L'erreur sur l'estimation du stress, induite par l'utilisation de la formule empirique de RITCHIE, est plus ou moins importante selon les situations climatiques. Elle se répercute au niveau de l'une ou l'autre des composantes du rendement. Il semble donc difficile de maîtriser l'erreur commise, ce qui nous conduit à préférer, dans le cas où l'ETP Penman ne peut être calculée, des formules empiriques adaptées au site concerné (voir annexe 9).

Rapport ETP Ritchie/ETP Penman
Avignon. 86

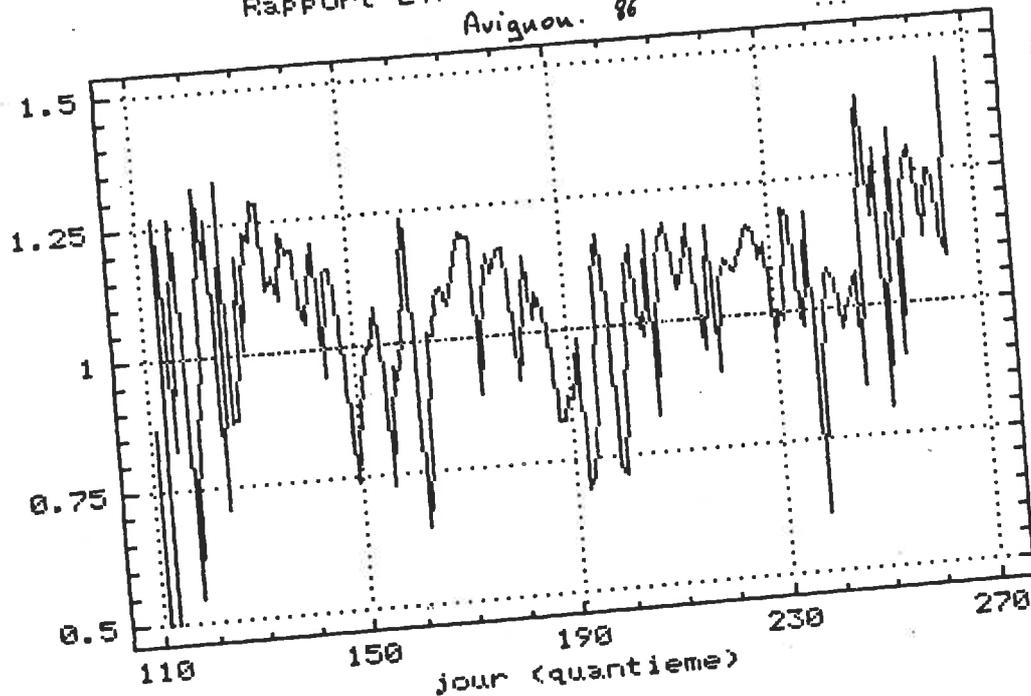


Figure 43a

Rapport ETP Ritchie/ETP Penman
Toulouse 86

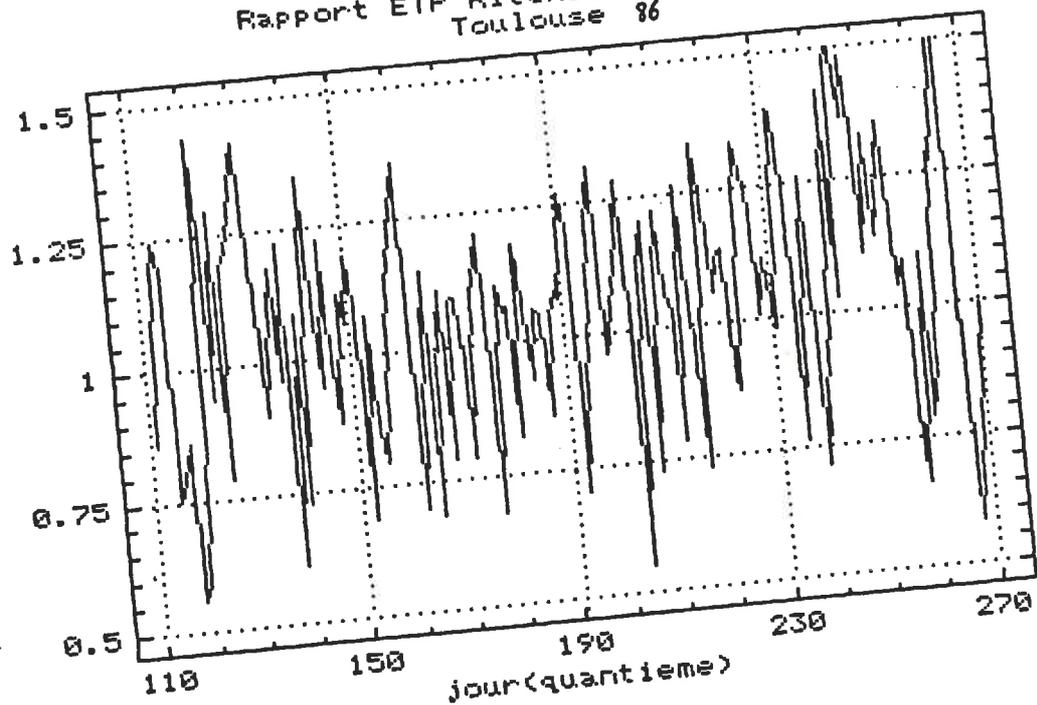


Figure 43b

La formulation de l'évaporation du sol en fonction du temps pose également des problèmes . En effet, ainsi que le montrent GILL et PRIHAR (1983) le coefficient d'ajustement, α , dépend de l'évaporation potentielle, de sorte que la relation expérimentale peut varier en fonction de la période. Ce qui conduit à utiliser des paramétrisations par ETP plutôt que par le temps (BOESTEN et STROOSNIJDER, 1985) Cette paramétrisation est utilisée par PERRIER (1973, 1982) qui propose une formulation simple de ES en fonction de ES_0 .

L'application du modèle de RITCHIE fait donc apparaître plusieurs problèmes, ce qui nous a conduit à élaborer un modèle de bilan hydrique mieux adapté au niveau des données d'entrée et des paramètres de fonctionnement

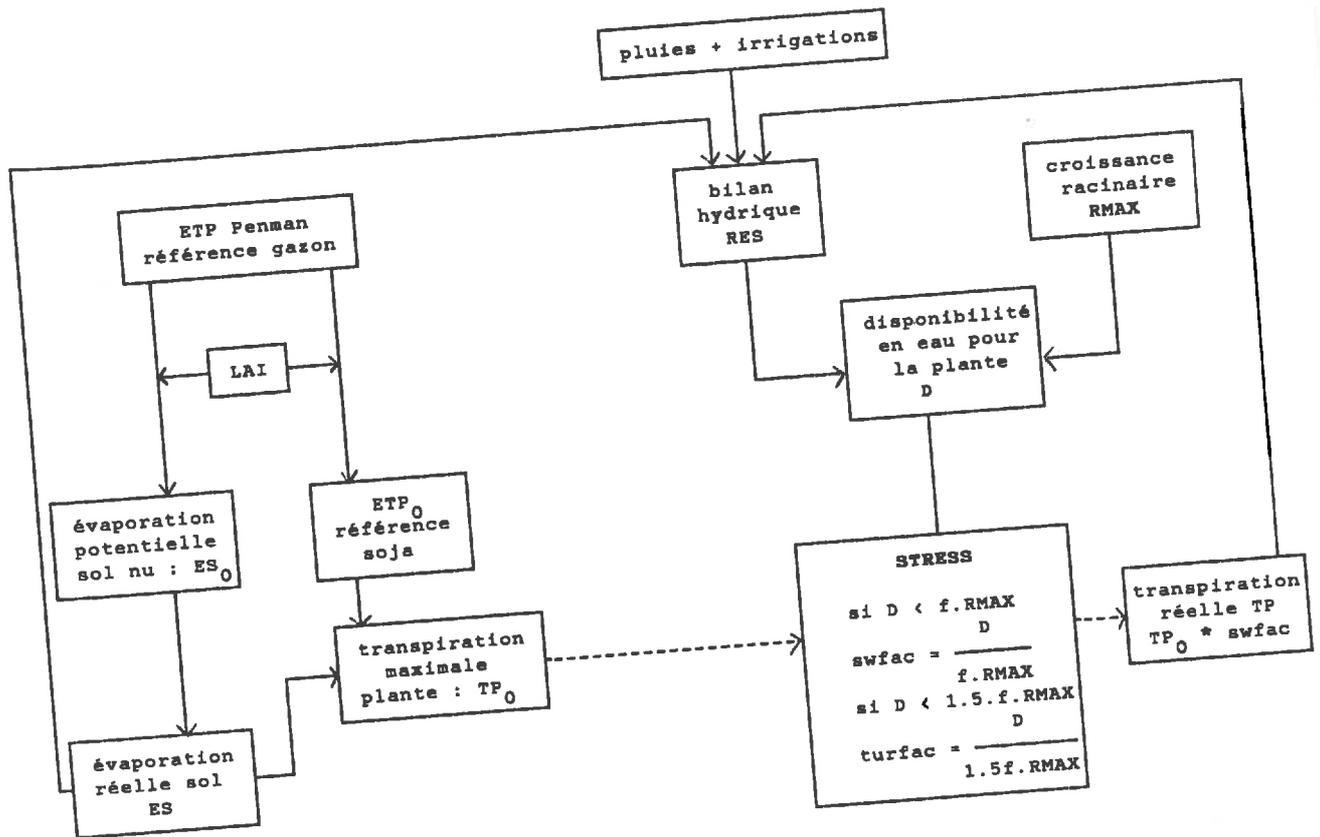


Figure 44 : Organigramme du modèle proposé

D ELABORATION D'UN BILAN HYDRIQUE POUR LES MODELES DE SIMULATION DE CULTURE

Le modèle que nous proposons répond à plusieurs objectifs. Il s'agit, tout d'abord, de générer des fonctions de stress journalières pouvant être réintroduites dans le modèle de croissance au niveau des fonctions physiologiques. Compte-tenu de nos objectifs, nous souhaitons réduire les données d'entrée concernant le sol dans l'optique d'une utilisation de routine du modèle SOYGRO. Enfin, nous nous attacherons à introduire des fonctions simples, tout en prenant en compte les phénomènes essentiels à une bonne description du fonctionnement hydrique de la culture tout au long de son cycle.

La liaison avec le module de croissance est assurée par l'indice foliaire. Par rapport au schéma général présenté au paragraphe précédent, l'originalité de ce modèle consiste en :

- . l'utilisation d'un modèle de type réservoir pour calculer les fonctions de stress.
- . la prise en compte des deux composantes de l'indice foliaire : taux de couverture du sol et structure du couvert, ce qui permet d'adapter la transpiration maximale à l'abondance du feuillage.
- . l'indépendance du schéma de développement de densité racinaire vis à vis du module de croissance.
- . l'utilisation d'un modèle d'évaporation du sol plus fiable que les modèles empiriques en λt utilisés par RITCHIE (1972).

Nous présenterons ici la spécificité de ce modèle par rapport à celui de RITCHIE, en suivant l'organigramme présentée figure 44. Ainsi, nous décrirons successivement le calcul de l'évaporation du sol nu, indispensable à l'évaluation des besoins hydriques de la plante représentés par la **transpiration maximale**, puis nous donnerons les modalités de calcul de la disponibilité en eau, ce qui nous conduira à la définition des facteurs de stress hydrique.

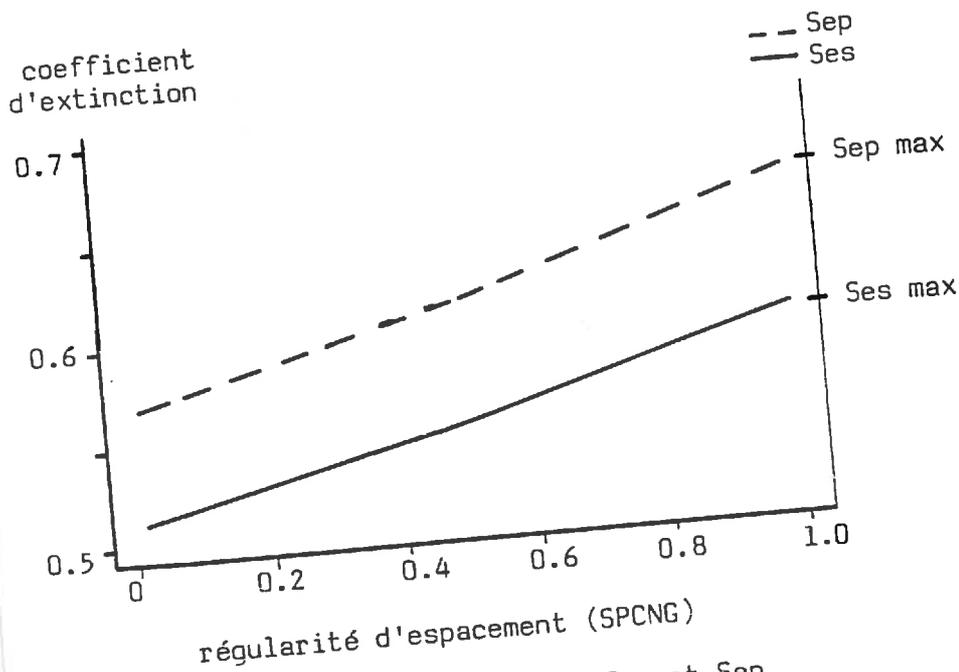


Fig 45 : Coefficients d'extinction Ses et Sep en fonction de l'espacement entre les plants

Influence de la régularité de l'espacement sur le calcul des flux potentiels (T_{P0} et E_{S0})

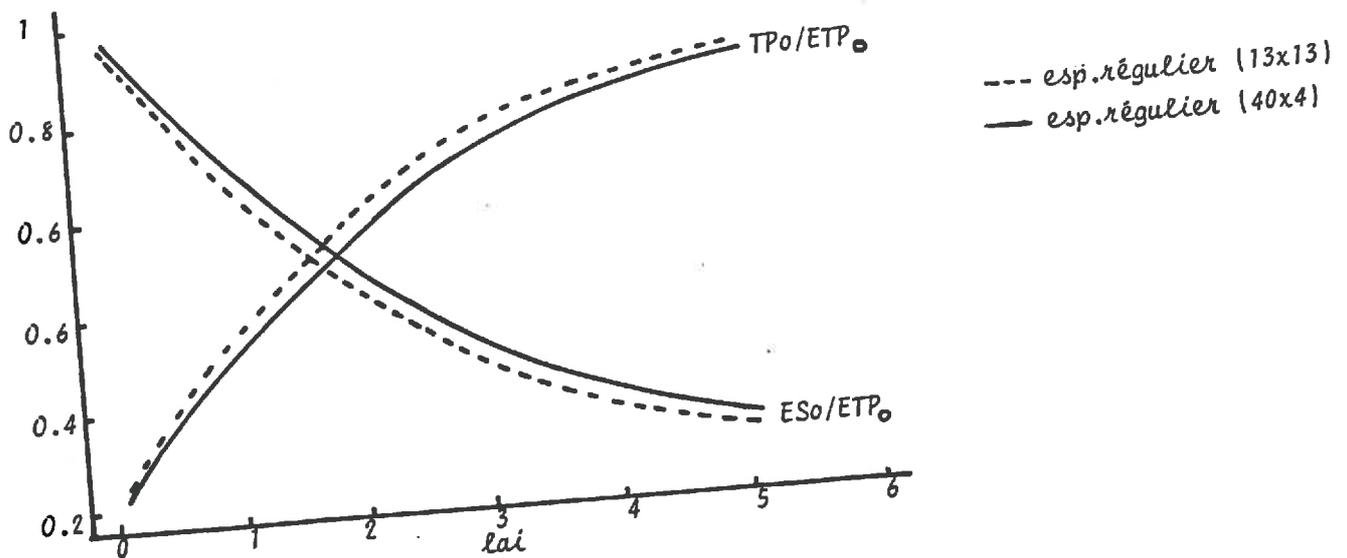


Figure 46

I. Calcul de l'évaporation du sol.

Il s'agit, en premier lieu, d'estimer la valeur potentielle ES_0 , puis de calculer l'évaporation réelle ES à partir d'une modélisation des transferts.

1. calcul de l'évaporation potentielle du sol nu ES_0 .

Pour tenir compte des insuffisances de l'ETP adoptée par RITCHIE, nous avons décidé d'utiliser, de façon classique, la référence ETP Penman, en exprimant la demande au niveau du sol par :

$$ES_0 = ETP * \exp -\delta_{es} * LAI$$

Cette formulation applique le même facteur correctif aux termes radiatif et convectif.

Par ailleurs, il nous a semblé intéressant d'introduire la régularité de l'espacement entre les plantes dans le calcul de δ_{es} , en référence au calcul du coefficient d'extinction photosynthétique, δ_{ep} . Cependant, les valeurs de δ_{ep} nous paraissant un peu forte (RITCHIE, 1972; LEMEUR, 1973), nous avons retenu une valeur maximale de δ_{es} de 0.6 (figure 45):

$$\delta_{es} = \delta_{esmax} * \delta_{ep} / \delta_{epmax} \quad \text{et} \quad \delta_{esmax} = 0.6$$

Ainsi, pour un même indice foliaire, l'évaporation potentielle du sol sera diminuée dans le cas d'espacements réguliers (figure 46). Nous avons adopté un coefficient d'extinction de 0.6, en référence à la valeur de 0.5 proposé par LEMEUR (1973) pour un espacement irrégulier et en intégrant la pondération précédente.

2. L'évaporation réelle du sol nu, ES .

Le modèle adopté est celui de PERRIER (1973, 1982), qui fait, comme le modèle de RITCHIE, intervenir deux phases :

- la phase d'évaporation constante ($ES=ES_0$) se prolongeant jusqu'à ce que $\Sigma ES = U$. Les valeurs de U ont été fixées à partir du travail de RITCHIE qui utilise le même paramètre pour séparer les deux phases d'évaporation du sol, et donc :

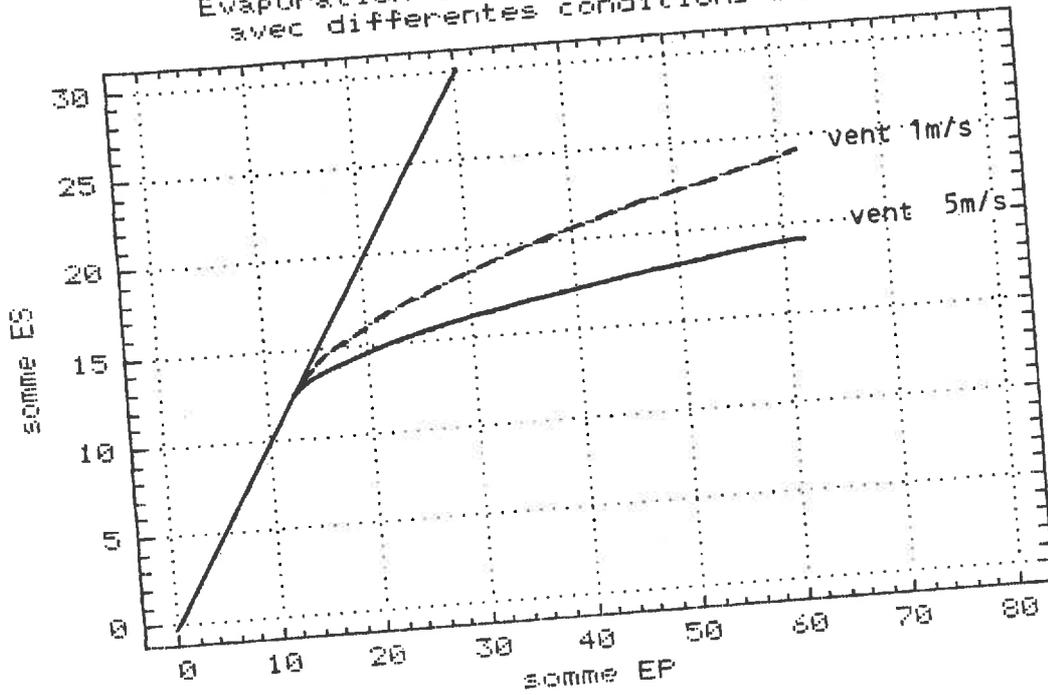
sol sableux ou vertique	: $U = 6\text{mm}$
sol limoneux	: $U = 9\text{mm}$
sol argileux	: $U = 12\text{mm}$

- la phase de réduction pour laquelle PERRIER établit analytiquement la formule suivante :

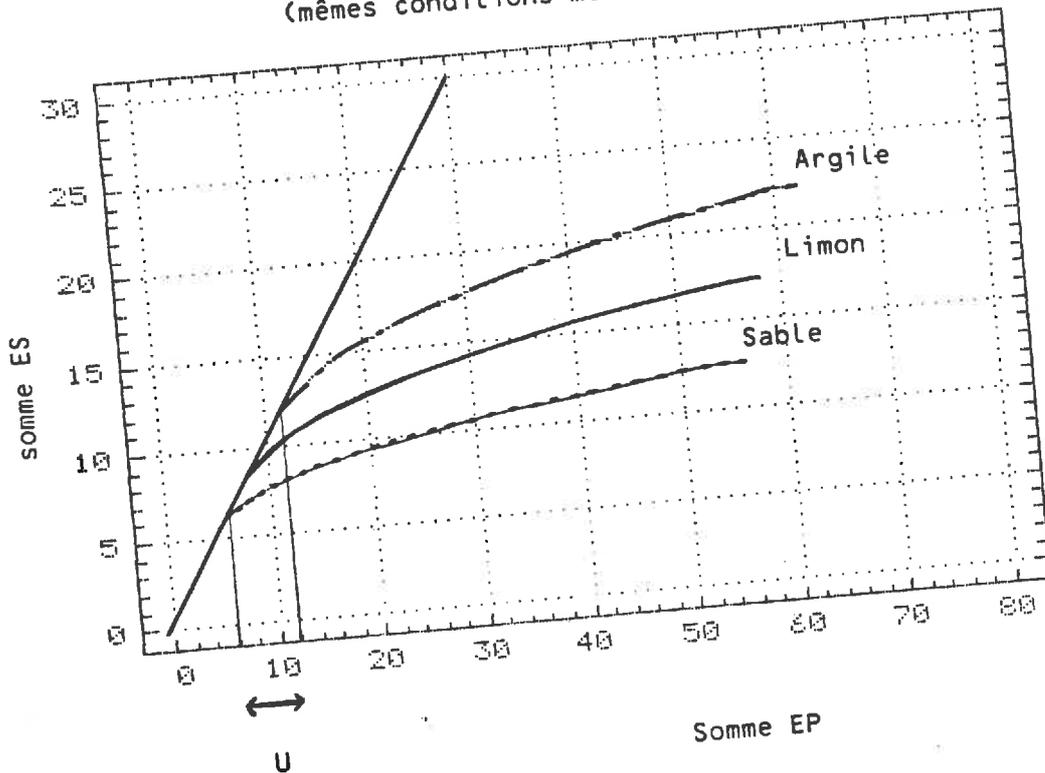
$$\Sigma ES = \sqrt{2A \cdot \Sigma EP + A^2} - A$$

où A est un paramètre calculable en fonction des conditions atmosphériques et du type de sol (figures 47 a et b au verso) et EP sera prise égale à ES_0 . Le calcul de A constitue une part importante de la mise en oeuvre du modèle. Nous

Evaporation d'un sol argilo-limoneux
avec différentes conditions météo



Modélisation de l'évaporation de 3 sols différents
(mêmes conditions météorologiques)



Figures 47a,b : Modèle de PERRIER $\sum ES - U = \sqrt{A^2 + 2A (\sum EP - U)} - A$

en avons effectué une analyse détaillée présentée en annexe
 6. Cette analyse nous conduit à adopter l'expression :

$$A = A_{\text{clim}} (.63 - H_a)^{1.67} (H_1 - H_a)$$

avec $A_{\text{clim}} = 9.85 \text{ mm/jour}$ et $H_a = 0.11 \text{ arg}$

où A_{clim} est la composante climatique de A , H_1 est l'humidité pondérale à la capacité au champ et H_a l'humidité pondérale du sol sec évaluée en fonction de la teneur en argile (arg), ce qui donne les valeurs suivantes pour différents types de texture (JAMAGNE et al., 1977):

TEXTURE	ARG%	H_1 %	H_a %	A
sable (SL)	5	12	0.5	0.45
limon sableux (LmS)	12	20	1.3	0.82
limon argileux (LA)	22	27	2.4	1.05
argilo-limoneux (AL)	37	32	4.1	1.13
argileux (A)	37	37	4.1	1.34

. Mise en oeuvre du modèle de sol nu

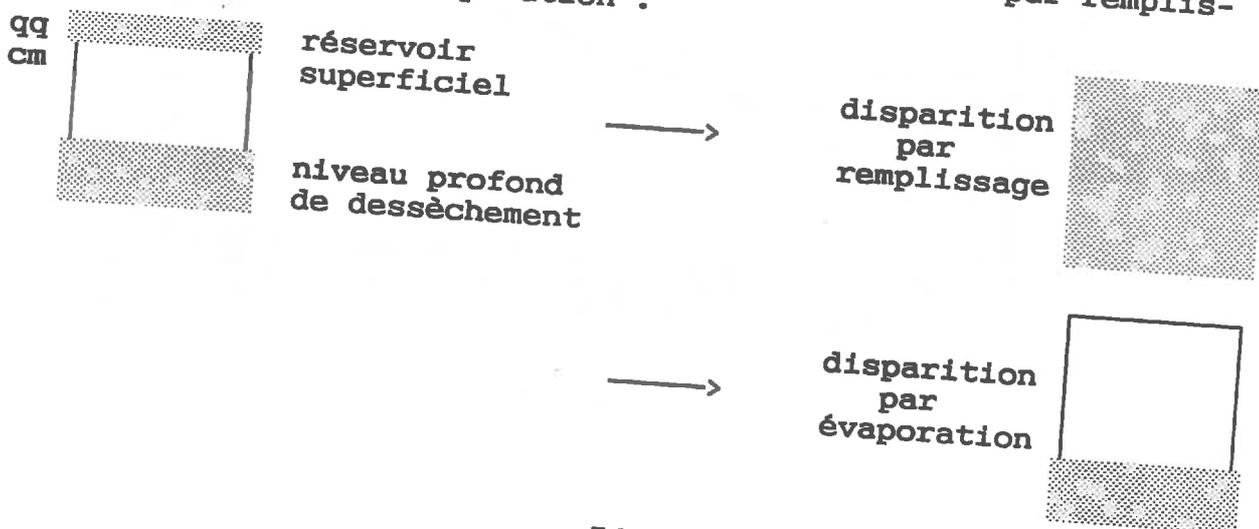
A partir de ces éléments, le calcul s'effectue de la façon suivante :

$$\text{Si } F(\Sigma ES) = \sqrt{A^2 + 2A\Sigma ESO} - A$$

en phase 1 $ES_j = ESO_j$
 en phase 2 $ES_j = F(\Sigma_j ESO) - F(\Sigma_{j-1} ESO)$

Un apport d'eau (pluie ou irrigation : PI) influe sur le dessèchement du sol selon 2 modalités :

- 1) l'apport est important ou l'état de dessèchement est peu important (on est en phase 1), alors l'apport contribue à la recharge du réservoir, il est considéré comme une évaporation potentielle négative.
- 2) l'apport est faible et l'état de dessèchement est important (on est en phase 2, même après apport), alors on crée un réservoir superficiel qui disparaîtra soit par remplissage, soit par évaporation.



Evolution de l'épaisseur du mulch pour
3 sols différents

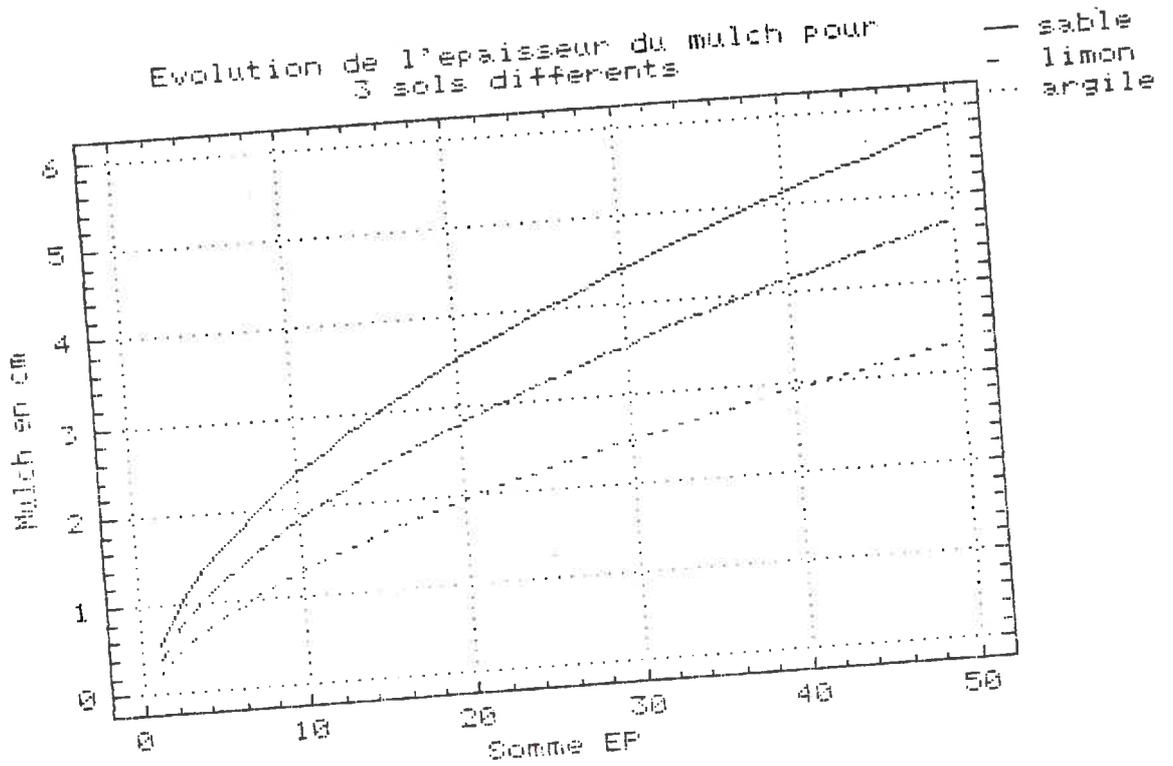


Figure 48

Evolution du mulch

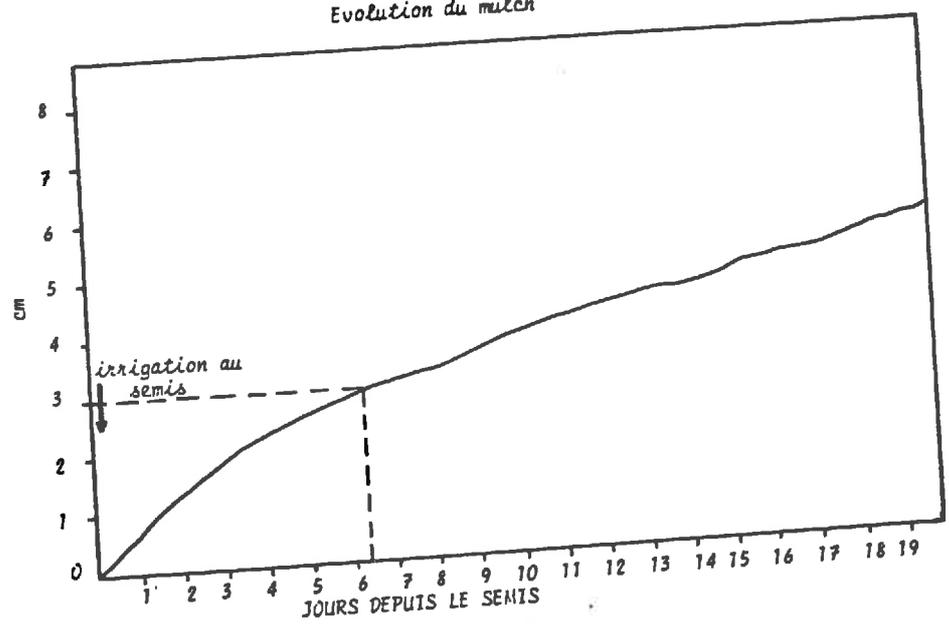


Figure 49

Les calculs précédents permettent de modéliser la formation de la couche superficielle de sol sec, ou mulch, particulièrement importante au début de la vie de la plante.

L'épaisseur x du mulch est accessible par la formule :

$$x = \frac{\Sigma ES}{L \cdot \rho_s \cdot (H_1 - H_2)}$$

Où L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau et ρ_s est la densité apparente du sol.

La vitesse de formation et l'épaisseur du mulch varie donc avec le type de sol (figure 48).

Jusqu'à la levée, seule l'évaporation du sol nu va participer au bilan hydrique. Il va se former un mulch qui peut, si le semis est trop superficiel, pénaliser la croissance racinaire. La figure 49 montre que l'irrigation au semis est très importante, seule une pluie précédant le semis de moins de 3-4 jours peut en dispenser (cas extrême du sud de la France sur sol léger). Nous ferons l'hypothèse que la surface du sol est toujours humidifiée au semis, c'est-à-dire que les processus de formation du mulch n'ont pas débuté avant le semis (humidité initiale de surface = capacité au champ).

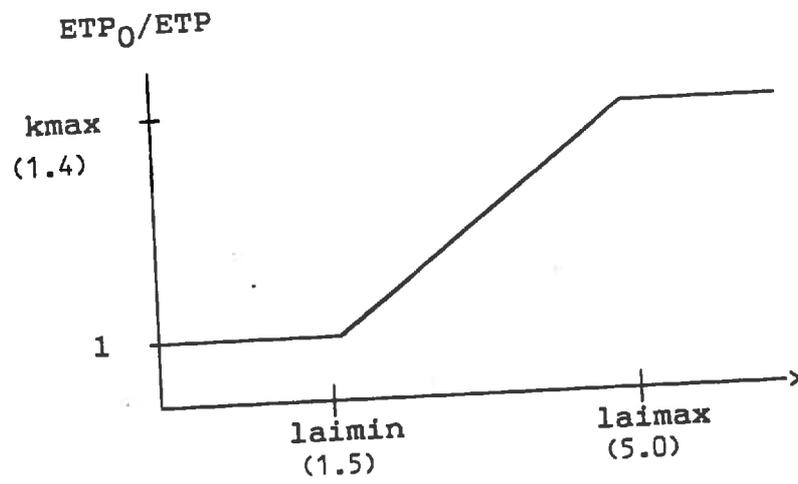


Figure 50. Réponse de l'Evapotranspiration maximale à l'indice foliaire

II. Calcul des besoins en eau de la plante, TP_0 .

Ce calcul s'effectuera en deux étapes :

- . estimation de la valeur maximale, ETP_0 de l'évapotranspiration
- . à partir de ETP_0 et de ES_0 , calcul de la transpiration maximale, TP_0

La transpiration réelle sera calculée, par la suite, à partir du bilan hydrique et de l'indice de stress résultant TP/TP_0 .

1. Evapotranspiration maximale d'un couvert de soja couvrant et homogène.

ETP_0 correspond à l'évapotranspiration d'une culture dont l'alimentation hydrique serait à l'optimum. Elle dépend de l'énergie disponible et de la structure du couvert (PERRIER, 1975, III). Pour un gazon $ETP_0 = ETP$ Penman. Pour une culture plus haute et plus développée que du gazon ETP_0 peut dépasser ETP Penman. Ainsi, au moment de son développement maximal, la culture de soja atteint des valeurs ETP_0/ETP (coefficient cultural) variant entre 1.2 et 1.5 (PUECH et BOUNIOLS, 1986; PEYREMORTE, 1987; MERRIEN, 1987). PUECH et HERNANDEZ (1973, repris dans PUECH et al., 1974) ont mis en évidence cette particularité du soja qui, comme le tournesol, est susceptible de consommer des quantités d'eau importante.

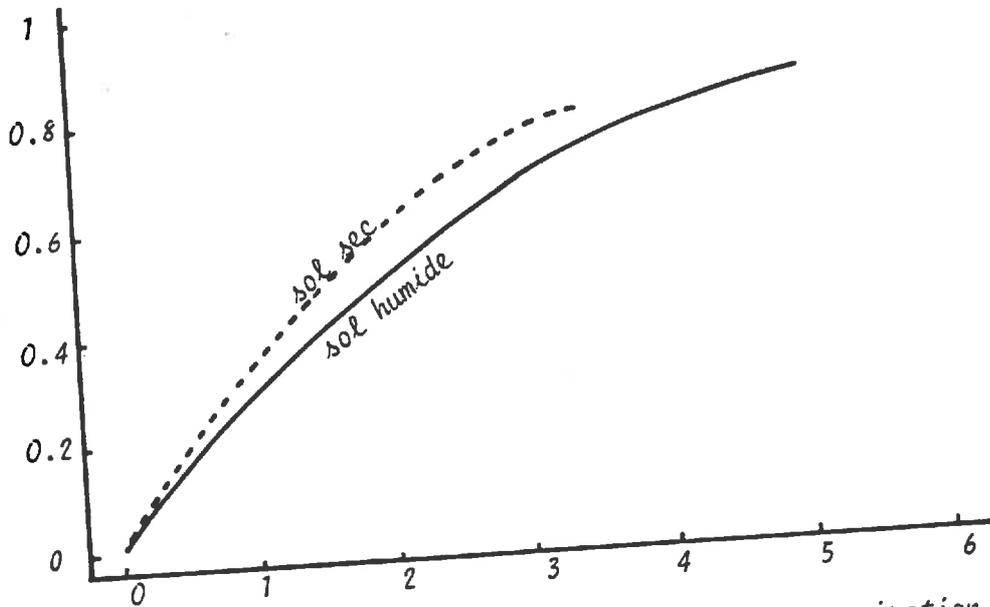
Ces observations expérimentales s'expliquent par les différences de résistance à l'évaporation entre un couvert de gazon et un couvert de soja bien alimentés en eau. Deux types de résistances sont impliquées : la résistance de structure du couvert et la résistance aérodynamique qui varie avec la rugosité et donc la hauteur du couvert (SLABBERS, 1977). Ces résistances peuvent s'exprimer en fonction de l'indice foliaire (PERRIER, 1981, 1982; KATERJI et PERRIER, 1985), ce qui nous conduit à utiliser une relation empirique reliant ETP_0/ETP au LAI (figure 50).

Compte tenu des observations précédentes, il serait plus logique d'appliquer un coefficient cultural directement à la transpiration (CHILDS et al., 1977). Malheureusement il n'existe aucune donnée expérimentale, permettant de réaliser ce calcul, ce qui nous amène à calculer TP_0 à partir de ETP_0 et de ES_0 .

2. Transpiration maximale de la plante, TP_0

Lorsque le sol est humide, il vient directement $TP_0 = ETP_0 - ES_0$. Cette relation simple ne s'applique cependant pas dans le cas d'un dessèchement du sol en surface, celui-ci créant un système d'advection microlocal (température plus élevée et humidité de l'air plus faible) qui augmente la demande climatique au niveau de la plante. TP_0 dépend donc de l'état de dessèchement du sol en surface.

TPO/ETPo



Influence de l'humidité du sol sur la transpiration maximale
 selon la formule : $TPO = (ETPo - ES_0) \left(\beta + (1-\beta) \frac{ES}{ES_0} \right)$
 $\beta = 1.1$

Figure 51

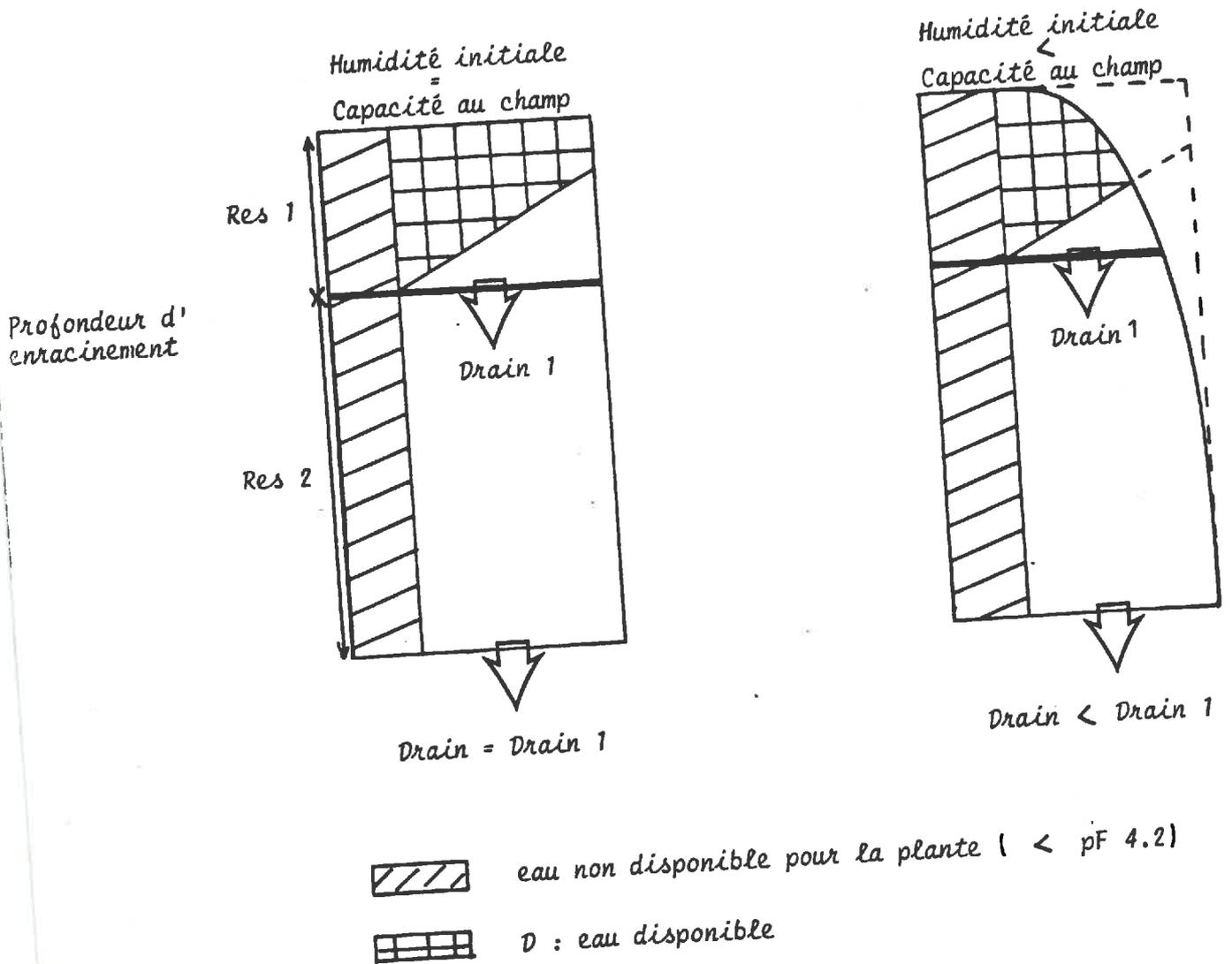


Figure 52 Partition du réservoir en eau du sol

Nous nous appuyerons sur la figure 37 pour proposer une quantification du phénomène, en supposant que pour le sol humide $ES=ES_0$ et pour le sol sec $ES=0$. Jusqu'à un niveau de LAI de l'ordre de 3, la relation existant entre les courbes "sol sec" et "sol humide" peut être supposée homothétique :

$$TP_0 \text{ sec} = \beta TP_0 \text{ humide}$$

Par conséquent, nous proposons la formalisation suivante illustrée par la figure 51 :

si $LAI < 3$ $TP_0 = TP_0 \text{ humide} (\beta + (1-\beta)ES/ES_0)$ et $TP_0 \text{ humide} = ETP_0 - ES_0$

si $LAI > 3$, alors le rôle joué par l'évaporation du sol est minime et $ES=ES_0$, on se trouve donc toujours sur la courbe "sol humide". Nous pouvons donc conserver la même formule.

La pondération de l'indice foliaire par la régularité de l'espacement dans le calcul de ES (voir paragraphe précédent), nous permet d'utiliser la plus petite valeur de β proposée dans la littérature, soit $\beta=1.1$ (DENMEAD, 1970). En effet, un taux de couverture du sol donné sera obtenu avec des indices foliaires d'autant plus élevés que l'espacement entre les plantes est irrégulier. Ce phénomène permet d'expliquer, en partie, l'obtention de β de l'ordre de 1.5 ou 2.

III Evaluation de la disponibilité en eau

Le sol est conçu comme un ensemble de deux réservoirs évolutifs :

- . le réservoir 1 : de la surface à la profondeur d'enracinement
- . le réservoir 2 : de la profondeur d'enracinement à celle du sol.

C'est la disponibilité de l'eau dans le réservoir 1 (D) qui affecte la plante. Elle dépend, comme l'illustre le schéma 52, de :

- . de la quantité totale d'eau à disposition de la plante dans le réservoir 1 (RES), ce que nous appellerons la disponibilité physique de l'eau. Le calcul de RES résulte d'un bilan hydrique au sens strict.
- . de la capacité de la plante à utiliser une quantité non limitante d'eau compte-tenu du développement de son système racinaire (RMAX), ce qui constitue une disponibilité biologique. Notons que RMAX correspond à un niveau de transpiration maximal. C'est cette variable qui prend en compte le profil de densité racinaire.

Par conséquent, on peut définir D comme la quantité minimale entre RES et RMAX.

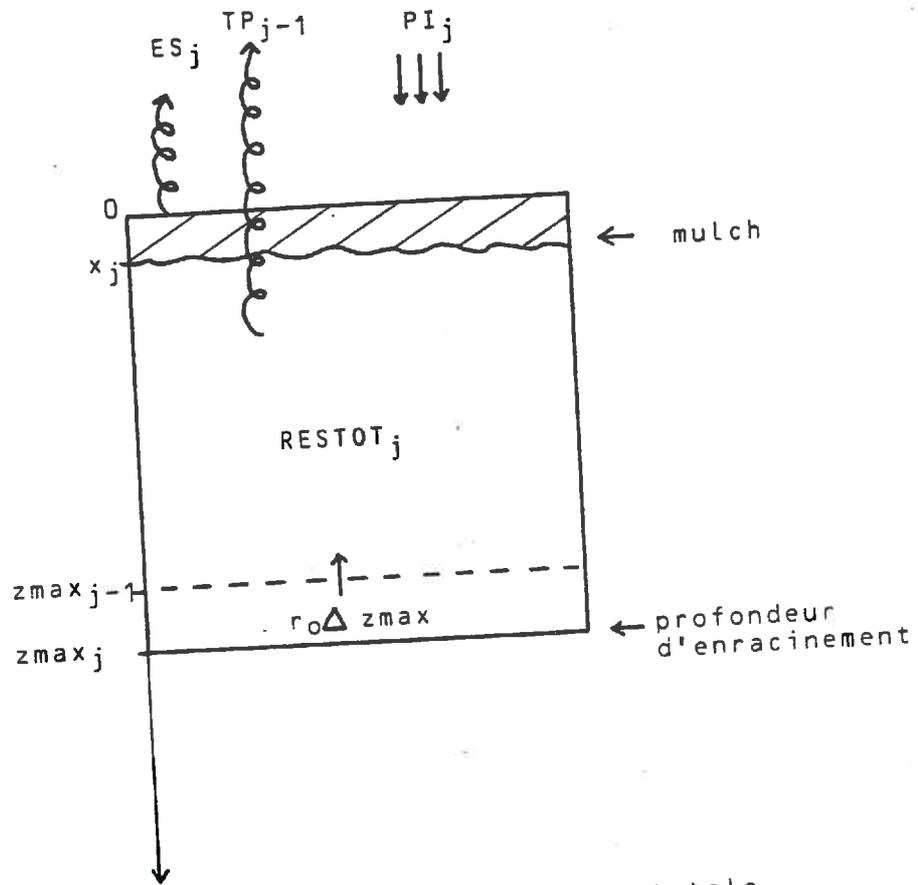


Figure 53a : Evaluation de la réserve totale

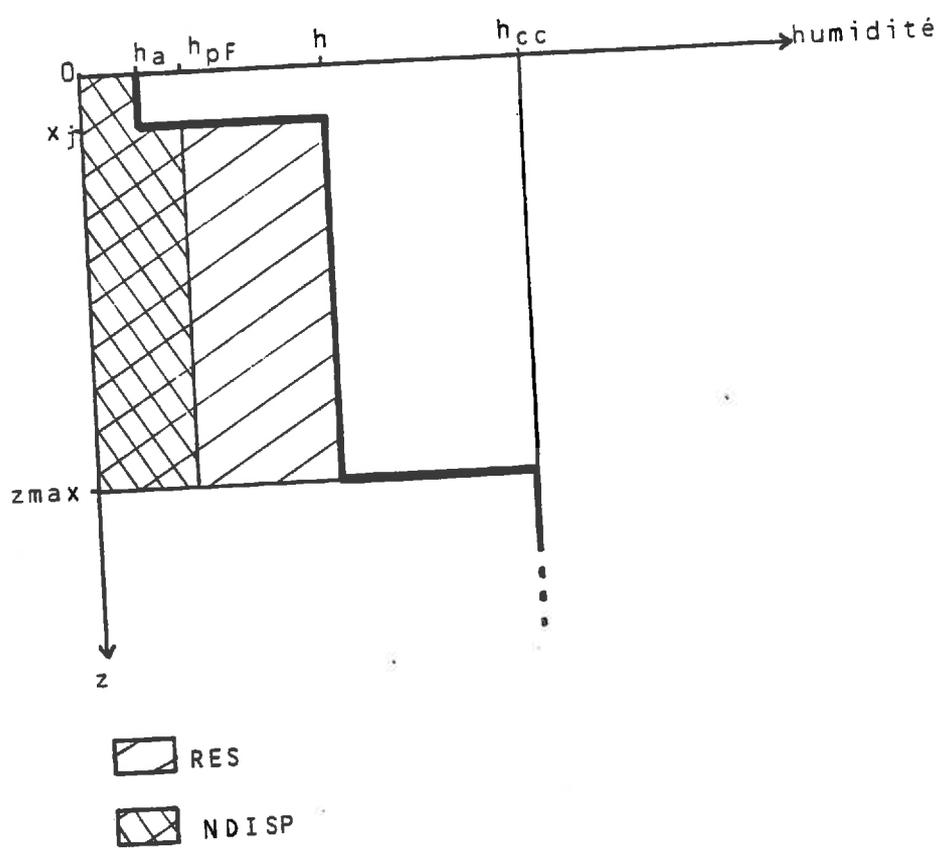


Figure 53b : Evaluation de l'eau non disponible et de la réserve réelle (RES)

1. Calcul de bilan hydrique (RES).

On évalue tout d'abord la réserve totale du réservoir 1, RESTOT (figure 53.a), selon un bilan hydrique classique :

$$\text{RESTOT}_j = \text{RESTOT}_{j-1} + \text{PI}_j - \text{TP}_{j-1} - \text{ES}_j + \int_{z_{\text{max}_{j-1}}}^{z_{\text{max}_j}} r_o(z) dz - \text{DRAIN1}$$

avec DRAIN1 = drainage du compartiment 1 vers le compartiment 2
= maximum (0 , RESTOT - z_{max_j} x r_{max_i})
et r_o(z) le profil d'humidité initiale (en mm/cm de sol).
La prise en compte de la transpiration du jour précédent permet de faire consommer les apports d'eau en priorité par l'évaporation du sol.

Il faut ensuite soustraire à RESTOT la quantité d'eau qui n'est pas disponible pour la plante, NDISP (figure 53.b).

$$\text{NDISP}_j = z_{\text{max}_j} \cdot r_{\text{mini}} - x \cdot (\text{Hpf} - \text{Ha}) \cdot f_{\text{ss}}$$

De plus, considérant qu'il n'y a pas d'eau disponible pour la plante dans le mulch, nous affecterons la réserve RES à l'épaisseur z_{max-x}. Ce qui revient à pondérer RES par le rapport z_{max} / (z_{max-x}).

On aboutit donc à la formule suivante :

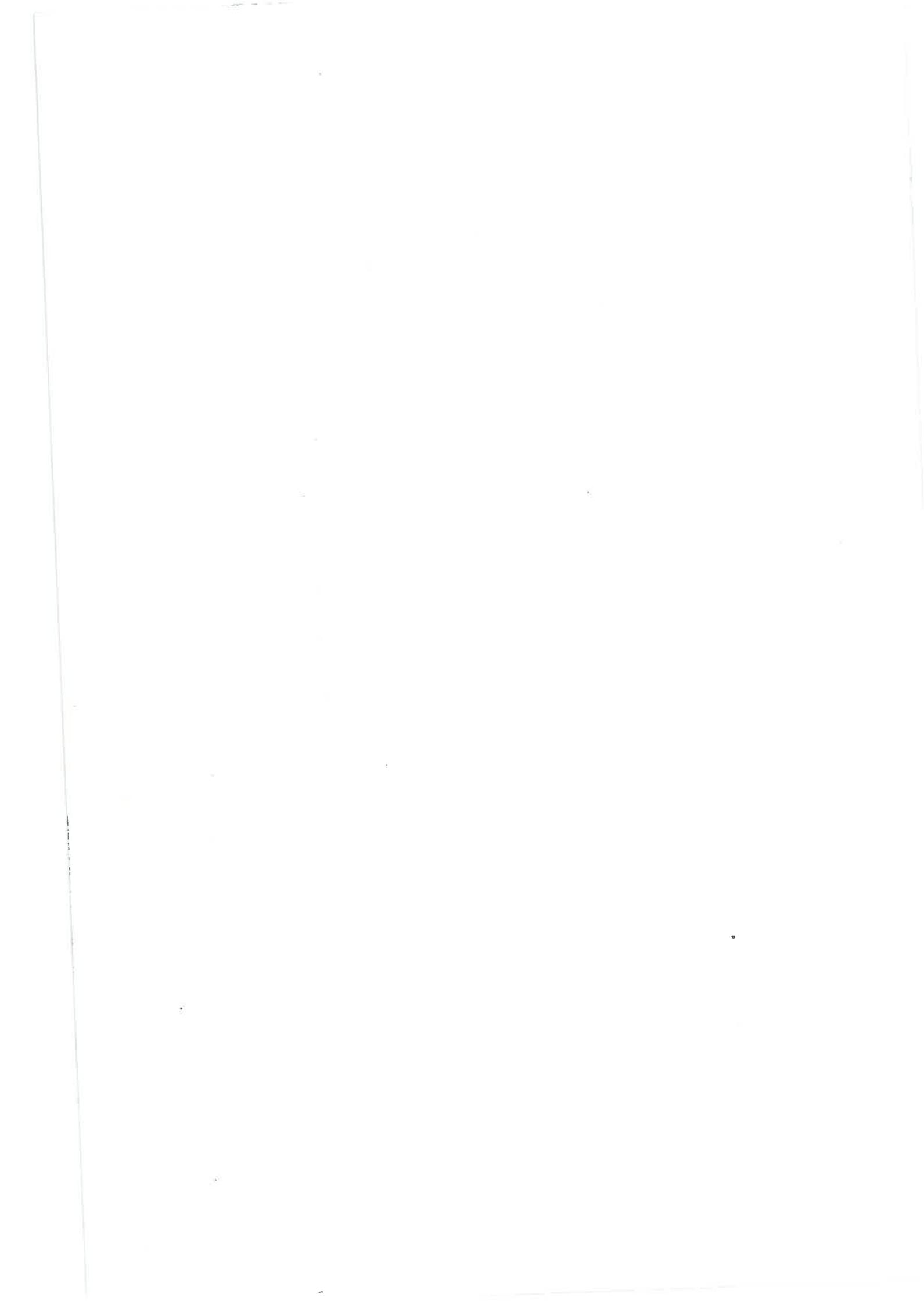
$$\text{RES}_j = (\text{RESTOT}_j - \text{NDISP}_j) \frac{z_{\text{max}}}{z_{\text{max-x}}}$$

. fixation du profil d'humidité initiale

Il est nécessaire de fixer le profil d'humidité initiale pour estimer correctement l'accroissement de RES dû à l'approfondissement du système racinaire, en particulier en conditions sèches. Or au semis, le sol est rarement à la capacité au champ (r_{max_i}), surtout dans le sud de la France.

On peut mesurer le profil initial, r_o(z), par une méthode gravimétrique ou neutronique. Néanmoins, il semble plus facile d'évaluer une réserve moyenne, qui constituera une donnée d'entrée :

$$r_{\text{om}} = 1/Z \int_0^Z r_o(z) dz$$



A partir de rom, nous reconstituons le profil probable (figure 52) selon une formulation simple et deux contraintes qui permettent de résoudre le système:

1. $ro(z) = a \sqrt{z} + b$
2. $rom = 1/prof \times \int_0^{prof} ro(z) dz$
3. $ro(prof) = rmaxi$

Si les apports d'eau sont abondants ($DRAIN1 \neq 0$), il vont permettre une réalimentation du second réservoir lorsque $rom < rmaxi$. Nous calculons, alors, un nouveau profil en eau du réservoir 2 avec :

$$rom_j = \left[\int_{zmax}^{prof} ro_j(z) dz + DRAIN1 \right] / (prof - zmax)$$

2. Prise en compte du développement racinaire au niveau de RMAX

RMAX doit intégrer le développement des racines en profondeur et en densité.

. croissance en profondeur

La croissance en profondeur est calculée en fonction de la température et du stress hydrique :

$$zmax = \Sigma Drac(j) * vitcroi * strac$$

où $\Sigma Drac(j)$ = somme de températures de l'air journalières (voir chapitre A)

vitcroi = vitesse de croissance

strac = fonction de stress racinaire (voir paragraphe suivant)

A partir de la levée vitcroi est estimée à 0.15 cm/°C (valeur donnée dans SOYGRO et retrouvée expérimentalement par MASSE et al, 1988 sur du blé). Avant la levée, elle sera prise égale à 0.22 pour tenir compte de la pré-formation de la radicule dans la graine. La croissance racinaire ainsi simulée est en accord avec BOUAZIZ et BRUCKLER (1989). Notons que la température est un paramètre classique pour décrire la croissance du front racinaire (STONE et al., 1983).

Il est important de connaître la profondeur du sol qui va stopper la croissance de zmax (si elle n'a pas été arrêtée avant).

. croissance en densité

Si la densité racinaire était, à tout moment du cycle, optimale vis à vis de l'absorption en eau, RMAX serait strictement proportionnelle à la réserve utile unitaire ($zmax_j \times ruu$).

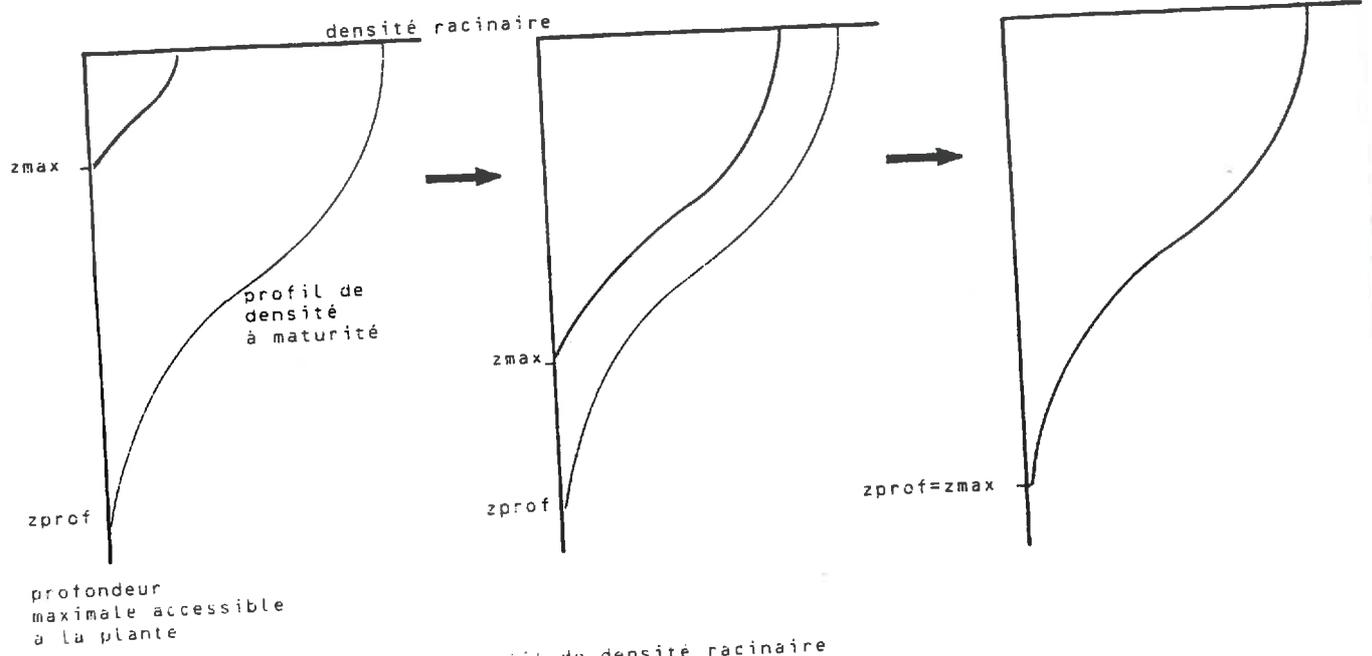


Figure 54a : Evolution du profil de densité racinaire

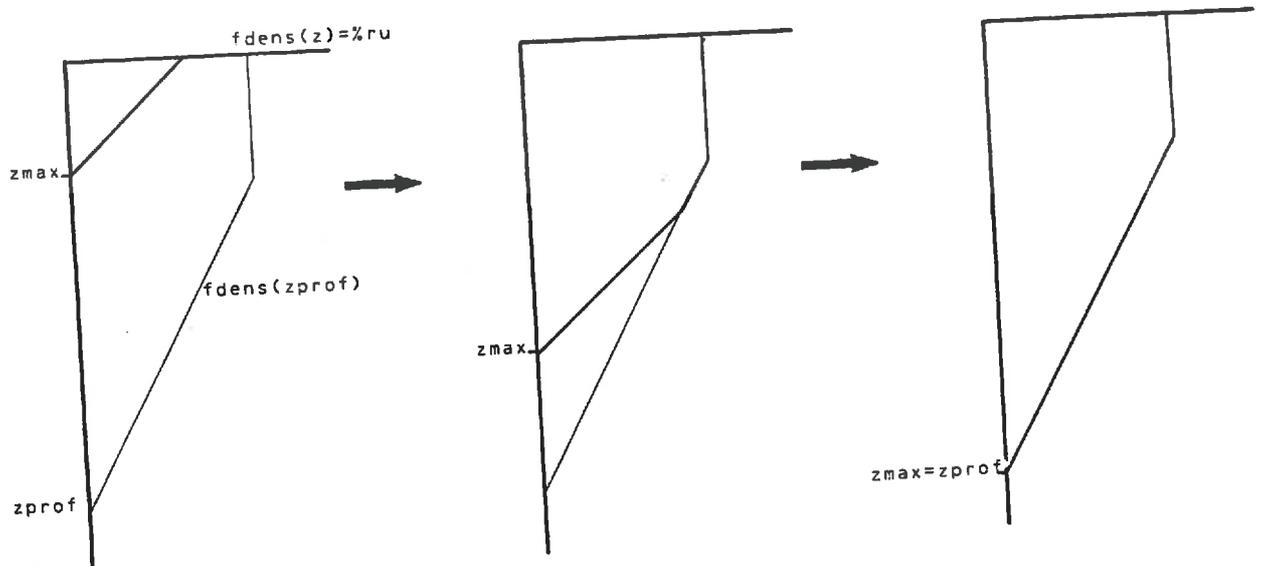


Figure 54b : Evolution de la fonction de densité racinaire

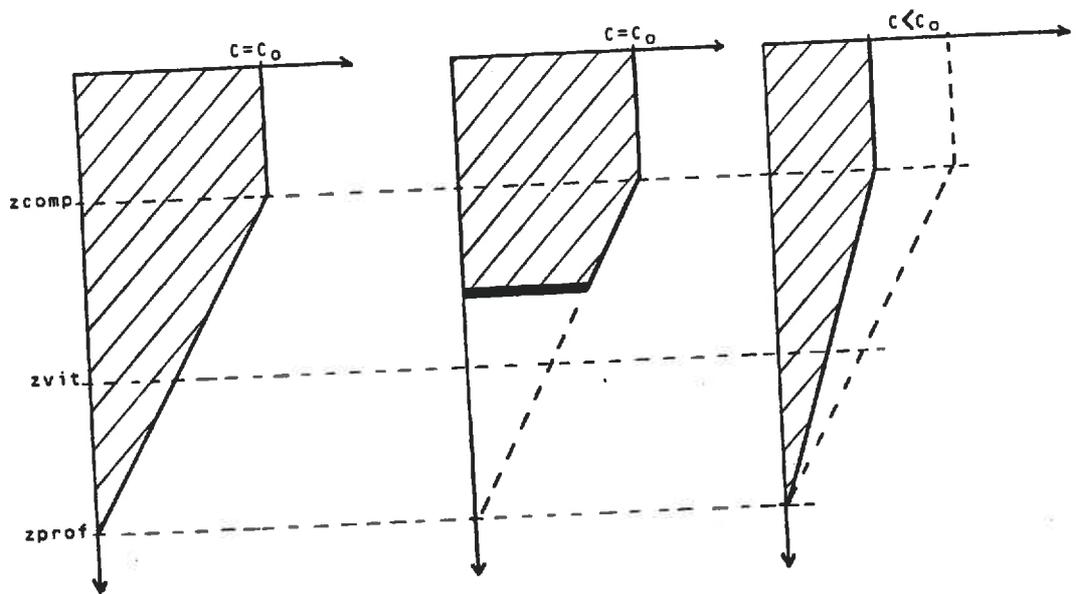
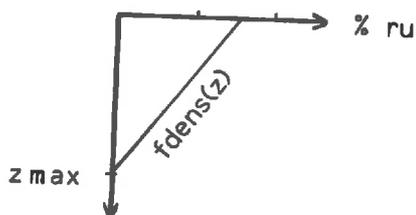


Figure 55a :
Famille de courbes
 $fdens(z, zmax_j)$

Figure 55b :
Prise en compte d'un
obstacle pédologique

Figure 55c :
Prise en compte du stress hydrique
(cas d'un stress sévère et permanent)

Mais l'état de développement du système racinaire au jour j, caractérisé par une profondeur z_{max_j} , n'offre pas à la plante les capacités d'absorber cette quantité d'eau, potentiellement à sa disposition. Pour tenir compte de cette contrainte nous avons choisi de pondérer ru par un facteur de densité racinaire qui évolue avec la profondeur ($fdens(z)$) et qui représente la proportion de réserve exploitable par les racines à la profondeur z :



Cette démarche nous a été suggérée par les travaux de MAERTENS (1988).

Ainsi, si on suppose que ru est homogène sur tout le profil :

$$RMAX = ru \int_{z=0}^{z_{max}} fdens(z) \cdot dz$$

$$\text{et } rmax(z) = ru \times fdens(z)$$

Pour bien reproduire l'évolution du profil de densité racinaire il faut faire évoluer $fdens(z)$ en fonction de z_{max_j} , à l'intérieur d'une courbe enveloppe représentant le profil de densité à son complet développement (figures 54).

Les observations de profil racinaire de MAERTENS (1986), complétées par les travaux de MASSE et al. (1988) et TARDIEU (1988) sur la caractérisation de la densité racinaire vis à vis de l'absorption d'eau (voir annexe 7), nous ont conduit à proposer une famille de fonctions $fdens(z_{max_j}, z)$ relativement simple. Quatre paramètres définissent cette famille (figure 55.a), leur choix est explicité en annexe 7 :

$C0$ = % maximum d'exploitation de la $ru = 1.1$

z_{comp} = limite de compactage = 50cm

z_{vit} = limite de vitesse d'évolution du profil = 120cm

z_{prof} = limite de croissance racinaire = 180cm

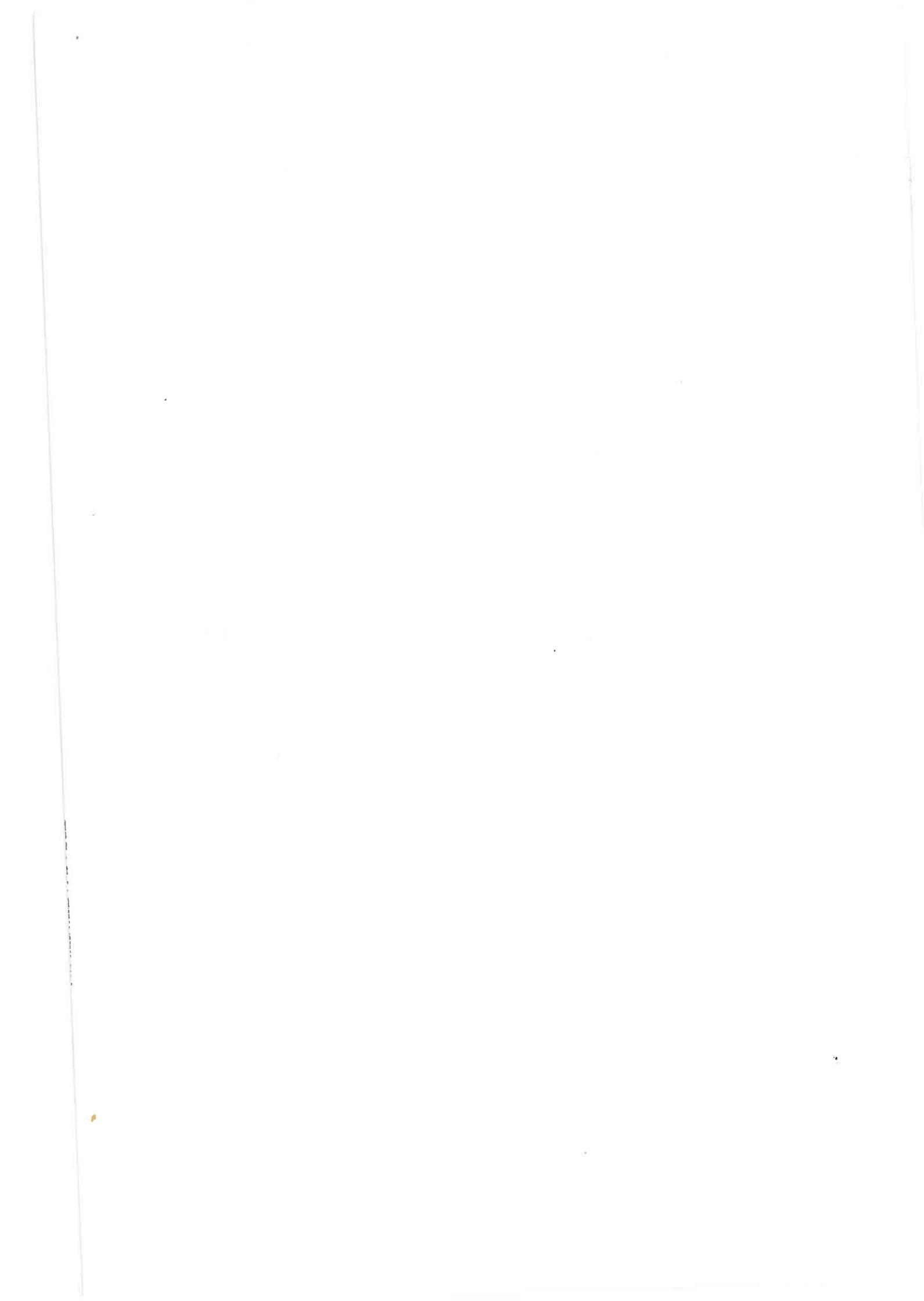
Si un obstacle pédologique entrave la progression du front racinaire (figure 55.b), $fdens(z)$ poursuit son évolution jusqu'à atteindre le profil final théorique tronqué au niveau de l'obstacle.

Nous avons vu que le stress hydrique affecte la croissance du front racinaire par le biais du facteur $strac$, ce qui par contre coupe limite la croissance de $RMAX$. Il faut également tenir compte de la sénescence racinaire due au stress hydrique et qui peut provoquer la chute de $RMAX$ en cas de déficit sévère. Nous avons choisi de jouer sur le paramètre C (figure 55.c):

$$C0 = 1.1$$

$$C_j = C_{j-1} - arac(1 - strac) \quad \text{avec } arac = 0.04$$

$$C_j \geq C0/2 \text{ soit } 0.55 \text{ (le phénomène reste limité)}$$



IV. Calcul des fonctions de stress adéquaté offre / demande.

Les fonctions de stress résultent de l'adéquaté entre la demande en transpiration (TP_0) et l'offre que constitue la disponibilité en eau du sol (D).

Contrairement au modèle de RITCHIE, D est une quantité d'eau et n'est pas homogène à TP_0 qui correspond à un flux. L'homologue de TP_0 en terme de réserve c'est R_{MAX} . Les fonctions de stress seront donc calculées en fonction du rapport D/R_{MAX} .

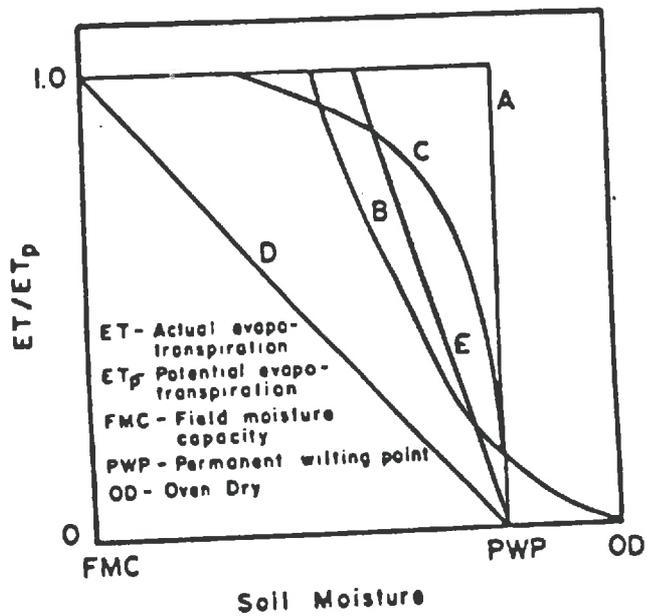
En fait, cette approche est tout à fait classique : si l'on prend $R_{MAX} = z_{max} \times r_u = RU$, alors le rapport précédent devient RES/RU , utilisée couramment dans les modèles de type "réservoir" pour calculer la réduction d'évapotranspiration, ET/ETP (FRANQUIN et FOREST, 1977 - FOREST et KALMS, 1984 - LHOMME et ELDIN, 1985 - ROBIN, 1986).

L'originalité de notre démarche est :

- . d'utiliser le modèle réservoir pour calculer une réduction de transpiration (et non d'évapotranspiration). En effet, les précautions prises dans le calcul de D , nous permettent de lier sa réduction par rapport à R_{MAX} à l'absorption de la plante et donc à la transpiration.
- . d'étendre cette démarche à d'autres fonctions de stress : stress d'expansion foliaire et stress de croissance racinaire.

1. Calcul de la réduction de transpiration (TP/TP_0) en fonction de la réduction de réserve.

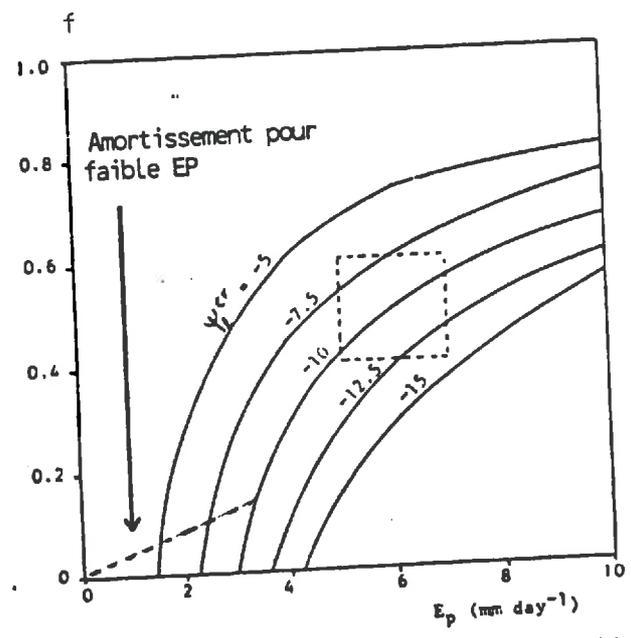
Comme le montre PERRIER (1982), l'évaporation du sol ne concerne que les quelques centimètres de surface et la diminution de la réserve en eau du sol est bien imputable à la transpiration de la plante (RITCHIE, 1974 - SUDAR et al., 1981 - HOWEL et MUSICK, 1984 - ROSENTHAL et al., 1985). Néanmoins, la part du sol dans l'évapotranspiration étant souvent négligeable (LAI élevé ou prise en compte de l'ensemble du cycle), il est fréquent d'utiliser ET/ETP au lieu de TP/TP_0 . Ce raisonnement est confirmé par SLABBERS (1980), qui a démontré analytiquement qu'il n'est possible d'aboutir à une relation simple entre ET/ETP et R/RU qu'en négligeant la résistance du sol à l'évaporation.



Various proposals for adjusting ET as soil moisture becomes limiting

Figure 56 Tirée de Baier, 1969

Propositions pour évaluer l'évapotranspiration en fonction de l'humidité du sol



Relation between potential evapotranspiration rate (E_p), critical leaf water potential (ψ_{cr}), and the fraction of available water at which reduction in evapotranspiration occurs (f)

Relation entre évapotranspiration potentielle, potentiel critique (ψ_{cr}) des feuilles et sensibilité à la diminution de l'eau disponible (f) (de la transpiration de la plante)

Figure 57 Tirée de Slabbers, 1980

Plusieurs types de relation ont été proposées (figure 56) : la relation A suppose que la plante ne souffre pas avant d'avoir atteint le point de flétrissement permanent; à l'opposé la relation D applique un stress dès que la réserve descend en dessous de la capacité au champ. Ces deux relations ne sont pas en accord avec les observations qui montrent l'existence d'un temps de latence entre la baisse de la réserve et le début du stress (ROSENTHAL et al, 1985 - SINCLAIR, 1986), c'est à dire une relation du type B, C ou E. A titre d'exemple, la formule proposée par EAGLEMAN (1971) et reprise par FRANQUIN et FOREST (1977) est de type exponentiel (relation C). En fait, d'après BAIER (1969), la forme de l'ajustement, linéaire (type E) ou exponentiel (type B ou C), influe peu sur les résultats compte tenu du niveau de précision du modèle.

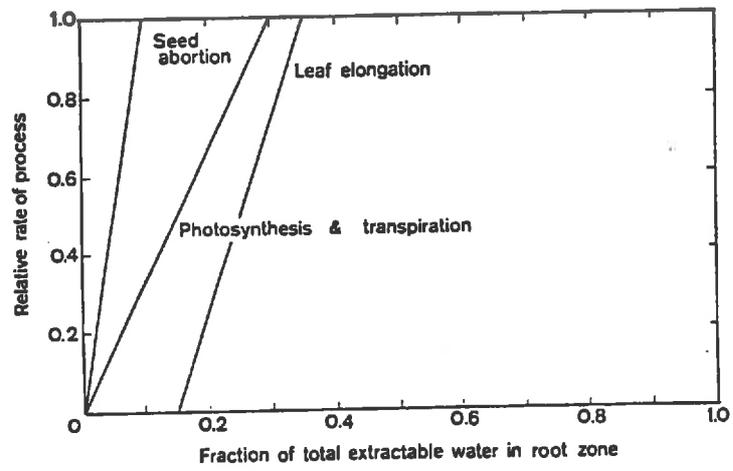
En revanche, selon les auteurs, la sensibilité de la transpiration à la diminution de l'eau disponible apparaîtra à des niveaux variables de R/RU allant de 0.25 à 0.50 (RITCHIE, 1972 - KANEMASU et al., 1976- MEYER et GREEN, 1981 - SINCLAIR, 1986). En 1964, HALLAIRE montre que le seuil de sensibilité à la transpiration dépend du niveau d'ETP. Et à partir de l'expression analytique de l'absorption de l'eau par la plante, qui prend en compte potentiels et résistance (voir explication modèle de Ritchie), SLABBERS (1980) exprime ce seuil (f) par la formule simplifiée suivante :

$$f = 0.94 + 0.26 \text{ PSI}^{\text{Cr}} / \text{ETP} \quad (\text{figure 57})$$

f est sans unité

le potentiel critique, PSI^{Cr} , est une constante liée à l'espèce (-10 bars pour le Soja, seuil que l'on retrouve sur la figure 26.a). La figure 57 montre que pour le soja et un niveau d'ETP moyen de l'ordre de 4 mm le seuil est de 0.3.

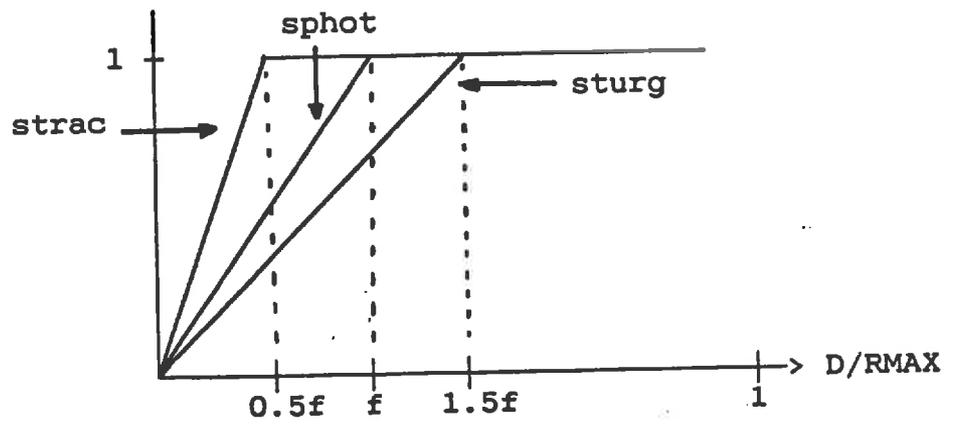
C'est cette approche qui nous a semblé la plus élaborée à l'heure actuelle et que nous avons retenue.



Suggested possibilities for expressing the influence of extractable soil water on the relative rate of various physiological processes.

Suggestions pour exprimer la réaction de diverses fonctions physiologiques à la diminution d'eau disponible

Figure 58 Tirée de Ritchie, 1981



Les fonctions de stress

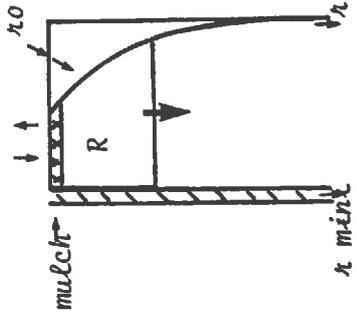
Figure 59

2. Adoption de trois fonctions de stress.

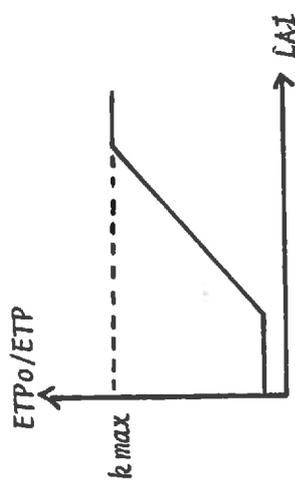
RITCHIE (1981) et ROSENTHAL et al. (1985) ont montré qu'il est possible d'utiliser les modèles réservoir pour calculer les fonctions de stress (figure 58). Nous avons donc décidé d'utiliser 3 fonctions de stress, dans un ordre croissant d'intensité :

strac = stress racinaire
sphot = stress de photosynthèse
sturg = stress de turgescence

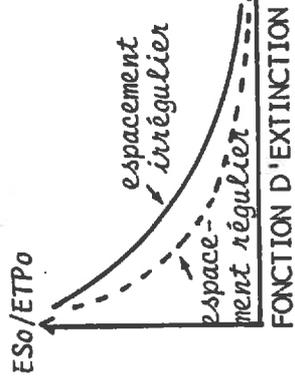
Le seuil de sensibilité de base (f pour sphot) est calculé par la formule de SLABBERS, en introduisant un amortissement pour les faibles niveaux d'ETP (figure 57). Les autres seuils sont calculés en fonction de f : $f_{sturg} = 1.5 \times f$ et $f_{strac} = 0.5 \times f$ (figure 59). Ces valeurs sont en rapport avec ce qu'utilise RITCHIE, bien qu'il ne s'agisse pas du même type de paramétrage.



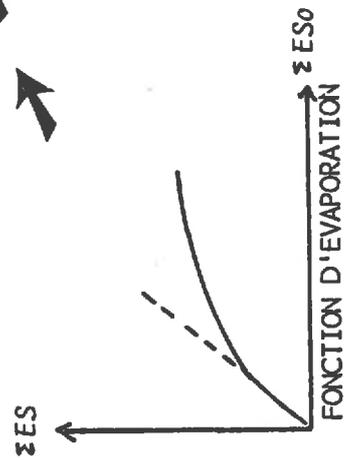
BILAN HYDRIQUE



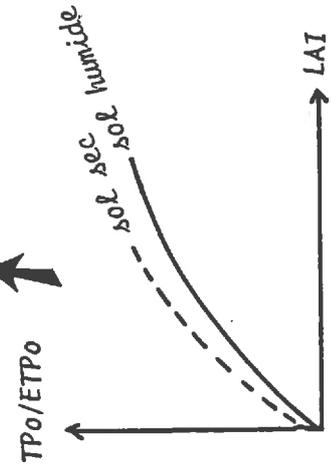
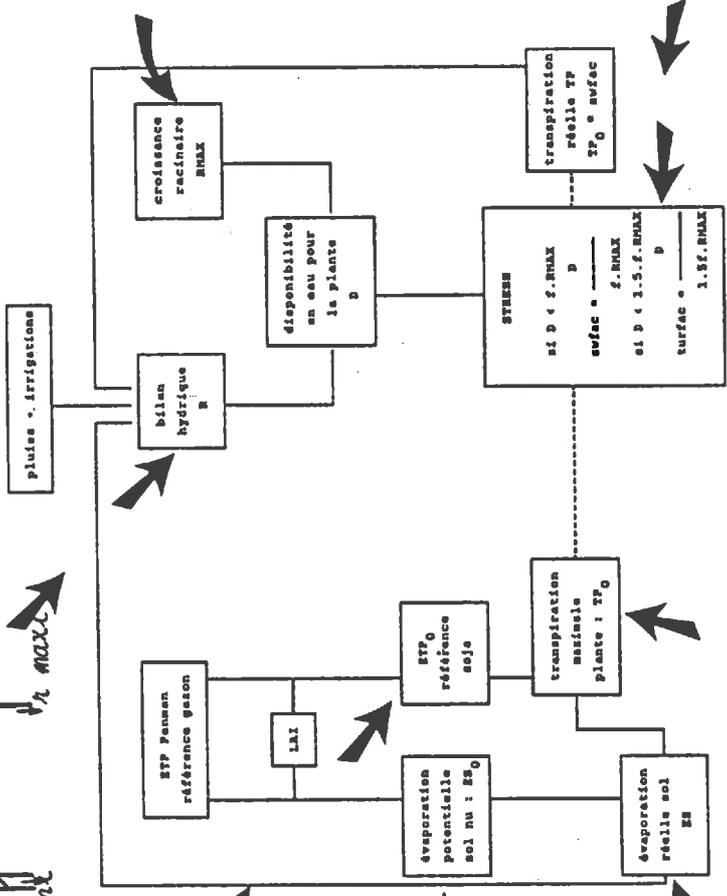
FONCTION D'ÉVAOPIRATIONS MAXIMALE



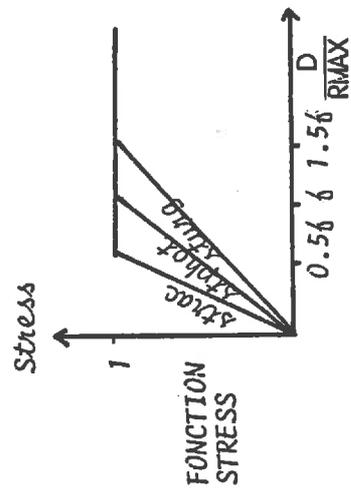
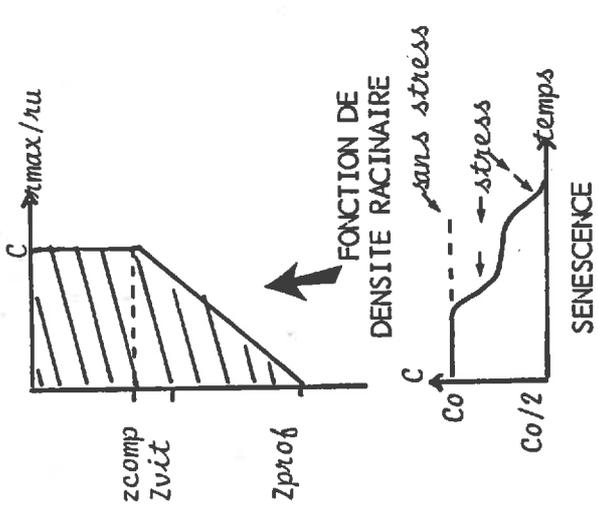
FONCTION D'EXTINCTION



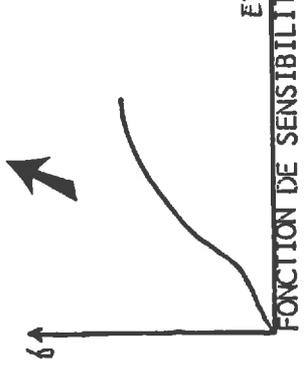
FONCTION D'ÉVAPORATION



FONCTION DE TRANSPARATION MAXIMALE



FONCTION STRESS



FONCTION DE SENSIBILITE

V. Synthèse du modèle

Le modèle que nous avons élaboré fait intervenir un ensemble de fonctions (résumées dans la figure 60) et de paramètres associés (récapitulés dans le tableau 12).

FONCTION	PARAMETRES ASSOCIES
* fonction d'évapo-transpiration maximale	$k_{max} = 1.4$ $LA_{imin} = 1.5, LA_{imax} = 5.0$
* fonction d'extinction	$\delta_{max} = 0.6$
* fonction d'évaporation	$A_{clim} = 9.85 \text{ mm}$
* fonction de transpiration maximale	$\beta = 1.1$
* bilan hydrique	$z_0 = 3 \text{ cm}, C_0 = 1.1$
* fonction de densité racinaire et	$z_{comp} = 50 \text{ cm}, z_{vit} = 120 \text{ cm}$ $z_{prof} = 180 \text{ cm}, C_0 = 1.1$
* fonction de sénescence racinaire	$a_{rac} = 0.04$
* fonctions de stress et	$f_{strac} = 0.5 f, f_{sturg} = 1.5 f$
* seuil de sensibilité (f) de SLABBERS	$\psi_i = -10 \text{ bars}$

Tableau 12 des paramètres : quand l'unité n'est pas spécifiée, les paramètres sont sans unité.

Il nous est apparu intéressant d'évaluer la sensibilité du modèle par rapport à ces paramètres, en les testant successivement et indépendamment les uns des autres.

Ainsi, nous avons fixé des fourchettes de variation cohérentes, en accord avec les résultats donnés dans la littérature, pour chacun des paramètres et nous avons analysé les résultats de ces variations sur différentes sorties du modèle : le rendement en grains et en matière sèche, les indices de stress par période et enfin l'indice foliaire maximal. Afin de compléter cette analyse, nous avons simulé deux types d'alimentation hydriques opposées : l'une en sec (1) et l'autre avec une irrigation abondante de 360 mm, les autres conditions culturales étant fixées (sol limoneux, de 1.5m de profondeur, à Toulouse en 1986).

(1) l'expression "en sec" signifie, pour nous, une absence d'irrigation. Cela ne correspond pas forcément à des conditions climatiques sèches.

TOULOUSE 86 SEC 360 mm LMS prof. 150 cm

paramètres (1)	(2)	rendt		indices de stress						LAI max
		grain	MS	semis-flo		floraison		remplis.		
Aclim	9.6	14.7	371	1.0	1.0	0.53	0.40	0.89	0.74	4.9
9.85	29.6	13.5	354	1.0	1.0	0.52	0.39	0.88	0.72	4.7
kmax	1.2	15.4	390	1.0	1.0	0.71	0.53	0.52	0.44	5.3
1.4	1.5	13.2	342	1.0	1.0	0.51	0.38	0.84	0.69	4.7
lainin	1.0	13.4	350	1.0	1.0	0.51	0.39	0.84	0.69	4.7
1.5	2.0	15.0	377	1.0	1.0	0.53	0.40	0.90	0.75	4.9
lainax	4.0	13.0	337	1.0	1.0	0.50	0.37	0.83	0.69	4.6
5.0	6.0	15.0	377	1.0	1.0	0.54	0.41	0.82	0.70	5.0
psi ^{cr}	- 12	13.1	365	1.0	1.0	0.51	0.39	0.91	0.78	5.0
- 10	- 8	15.3	366	1.0	1.0	0.53	0.39	0.88	0.72	4.6
gemax	0.5	14.4	375	1.0	1.0	0.53	0.40	0.88	0.73	5.1
0.6	0.7	13.8	351	1.0	1.0	0.51	0.39	0.88	0.73	4.6
$\beta(TP_0)$	1.1	13.9	360	1.0	1.0	0.52	0.39	0.87	0.71	4.8
1.1 ⁰	1.5	12.4	302	1.0	0.99	0.47	0.35	0.66	0.56	4.0
zvit	100	14.5	366	1.0	1.0	0.53	0.39	0.88	0.73	4.6
120	140	13.6	359	1.0	1.0	0.52	0.40	0.86	0.71	5.1
zcomp	30	13.5	361	1.0	1.0	0.51	0.39	0.90	0.77	5.1
50	70	14.9	369	1.0	1.0	0.53	0.39	0.86	0.70	4.6
zprof	160	14.0	363	1.0	1.0	0.52	0.39	0.90	0.75	4.8
180	200	14.0	360	1.0	1.0	0.52	0.39	0.84	0.69	4.8
Co	1	12.3	312	1.0	0.99	0.48	0.36	0.86	0.73	4.1
1.1	12	16.2	402	1.0	1.0	0.71	0.54	0.53	0.43	5.5
zo	2	14.1	362	1.0	1.0	0.52	0.39	0.86	0.71	4.8
3	5	14.0	361	1.0	1.0	0.52	0.39	0.87	0.71	4.9
fsturg	1.3	13.3	347	1.0	1.0	0.61	0.50	0.53	0.48	5.0
1.5	1.7	14.6	361	1.0	1.0	0.54	0.37	0.83	0.66	4.7
fstrac	0.3	13.5	356	1.0	1.0	0.52	0.39	0.84	0.69	4.8
0.5	0.7	14.2	366	1.0	1.0	0.52	0.39	0.86	0.71	4.8
arac	0.01	12.9	346	1.0	1.0	0.51	0.38	0.74	0.58	4.8
0.04	0.07	14.3	363	1.0	1.0	0.52	0.39	0.87	0.71	4.8

surestimation	24.9	534	1.0	1.0	0.84	0.60	0.56	0.61	6.1
sousestimation	6.2	208	0.98	0.97	0.38	0.33	0.20	0.17	3.4

TABLEAU 13.a : SENSIBILITE DU MODELE DE BILAN HYDRIQUE AUX PARAMETRES EN ALIMENTATION HYDRIQUE LIMITANTE

(1) : nom du paramètre et valeur prise dans le modèle
 (2) : fourchette des valeurs utilisées

Les résultats, regroupés dans les tableaux 13, révèlent une relative robustesse du modèle vis à vis des paramètres (pris indépendamment les uns des autres), puisqu'une erreur d'estimation de l'un d'entre eux n'a que de faibles effets sur le rendement, n'excédant pas 3 qx en sec et 4 qx en irrigué.

Dans le détail, la réaction des différentes fonctions du modèle souligne les interactions, simulées, entre le fonctionnement hydrique de la culture, sa croissance végétative et la mise en place du rendement :

- . la diminution de l'évapotranspiration maximale par l'un quelconque des 3 paramètres, qui définissent la courbe de réponse de ETP0 au LAI, augmente le rendement (d'un maximum de +1.5 ql aussi bien en sec qu'en irrigué). Cela s'explique par le fait que ETP0 détermine les niveaux potentiels de l'évaporation et de la transpiration, c'est-à-dire la consommation maximale de la réserve en eau, et tend à accroître le stress.
- . la fonction d'extinction joue sur l'intensité relative de ESO par rapport à ETP0, qui se répercute directement sur TPO et donc sur l'intensité du stress par un processus similaire au précédent; la variation de rendement résultante reste inférieure au quintal.
- . à l'inverse des deux situations précédentes, une réduction de l'évaporation du sol (pour un niveau potentiel, ESO, identique), résultant de la diminution du paramètre Aclim, permet une économie d'eau dans la réserve du sol et donc une limitation du stress qui accroît le rendement. En réalité, ce phénomène ne joue qu'en situation hydrique limitante (+ 0.8 ql en sec, sans effet en irrigué).
- . la sur-estimation du paramètre β augmente la transpiration maximale, ce qui conduit, à nouveau, à augmenter la consommation, à réduire la réserve disponible, à accroître le stress et réduire le rendement (jusqu'à -1.5 ql en sec).
- . en ce qui concerne le bilan hydrique, il est rassurant de constater que la profondeur de semis n'a aucune influence sur les sorties du modèle. Par contre, le paramètre C_0 , qui intervient directement sur la réserve disponible pour la plante, apparaît comme le paramètre le plus sensible aussi bien en sec (± 3 qx) qu'en irrigué (± 4 qx).

TOULOUSE 86 IRR 360 mm LMS prof. 150 cm

paramètres (1)	rendt grain MS (2)	indices de stress								LAI max
		semis-flo		floraison		remplis.				
Aclim	9.6	47.4	891	1.0	1.0	1.0	0.91	0.99	0.93	7.3
9.85	29.6	47.2	886	1.0	1.0	1.0	0.90	0.99	0.93	7.3
kmax	1.2	48.7	910	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	7.4
1.4	1.5	43.6	829	1.0	1.0	0.97	0.83	0.96	0.85	7.1
laimin	1.0	47.0	877	1.0	1.0	0.99	0.89	0.99	0.92	7.3
1.5	2.0	47.5	890	1.0	1.0	1.0	0.91	0.99	0.93	7.3
laimax	4.0	46.8	873	1.0	1.0	0.99	0.89	0.99	0.92	7.2
5.0	6.0	47.8	895	1.0	1.0	1.0	0.92	0.99	0.94	7.3
pa1 _{cr}	- 12	48.3	899	1.0	1.0	1.0	0.96	0.99	0.97	7.4
- 10	- 8	45.5	852	1.0	1.0	0.98	0.84	0.98	0.87	7.1
demax	0.5	47.6	891	1.0	1.0	1.0	0.92	0.99	0.93	7.3
0.6	0.7	47.0	883	1.0	1.0	0.99	0.90	0.99	0.92	7.3
β(TP)	1.1	47.2	885	1.0	1.0	1.0	0.90	0.99	0.93	7.3
1.10	1.5	46.1	861	1.0	1.0	0.99	0.86	0.98	0.90	7.1
zvit	100	47.1	883	1.0	1.0	1.0	0.89	0.99	0.92	7.2
120	140	47.4	894	1.0	1.0	1.0	0.92	0.99	0.93	7.4
zcomp	30	48.1	897	1.0	1.0	1.0	0.94	0.99	0.95	7.4
50	70	46.6	867	1.0	1.0	0.99	0.86	0.99	0.91	7.1
zprof	160	48.1	892	1.0	1.0	1.0	0.92	0.99	0.95	7.3
180	200	47.0	885	1.0	1.0	1.0	0.90	0.99	0.91	7.3
Co	1	43.1	816	1.0	1.0	0.95	0.79	0.97	0.87	6.9
1.1	12	48.5	908	1.0	1.0	1.0	0.97	1.0	0.98	7.4
zo	2	47.2	887	1.0	1.0	1.0	0.90	0.99	0.93	7.3
3	5	47.2	889	1.0	1.0	1.0	0.91	0.99	0.93	7.3
fsturg	1.3	47.3	894	1.0	1.0	1.0	0.96	0.99	0.96	7.4
1.5	1.7	47.1	878	1.0	1.0	1.0	0.85	0.99	0.89	7.1
fstrac	0.3	47.2	885	1.0	1.0	1.0	0.90	0.99	0.93	7.3
0.5	0.7	47.2	885	1.0	1.0	1.0	0.90	0.99	0.93	7.3
crac	0.01	47.2	885	1.0	1.0	1.0	0.90	0.99	0.93	7.3
0.04	0.07	47.2	885	1.0	1.0	1.0	0.90	0.99	0.93	7.3
surestimation		48.7	910	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	7.4
sousestimation		35.8	633	1.0	0.95	0.82	0.53	0.98	0.85	3.8

TABLEAU 13.b : SENSIBILITE DU MODELE DE BILAN HYDRIQUE AUX PARAMETRES EN ALIMENTATION HYDRIQUE NON LIMITANTE

(1) : nom du paramètre et valeur prise dans le modèle
 (2) : fourchette des valeurs utilisées

. interviennent également sur la disponibilité en eau, les paramètres de densité racinaire (ils jouent sur l'évolution de R_{max}) qui, en contribuant à épuiser plus ou moins rapidement la réserve, déterminent le moment d'apparition du stress et son intensité. Cet effet conduit à des conséquences opposées suivant que l'on se situe en conditions sèches ou irriguées :

. en sec, une évolution rapide de R_{max} (faible z_{vit} , z_{comp} élevé) provoque un stress précoce qui limite la croissance du système foliaire. Si toutefois, l'indice foliaire se maintient au dessus du niveau optimum pour la photosynthèse (4.5) alors les organes reproducteurs bénéficient du maximum d'assimilats disponibles, la fonction 'puits' des feuilles étant minimisée.

. en irrigué, le stress apparaît plus tard, quand le système foliaire est déjà en place. Il ne peut plus y avoir de compensation entre la croissance foliaire et la mise en place des gousses.

. la sénescence racinaire, prise en compte par les paramètres α_{rac} et σ_{rac} , provoque une baisse de R_{max} en conditions sèches, ce qui permet de limiter le stress et avec lui la chute de rendement. Cet effet reste, toutefois limité (+ 0.4 ql sur le rendement au maximum) et ne joue aucun rôle en conditions irriguées.

. le potentiel critique, qui définit le seuil de sensibilité au stress en fonction de l'ETP, joue un rôle important qui diffère selon les conditions hydriques. Un potentiel élevé en valeur absolue détermine une bonne résistance à la sécheresse, ce qui se vérifie au niveau des indices de stress. Mais, pour l'exemple de la culture menée en conditions limitantes au plan hydrique, ce qui se répercute sur l'alimentation de la plante en assimilats, intervient là encore la compétition feuilles/graines

. le même phénomène se retrouve dans l'influence du stress de turgescence.

Si, à présent, on simule le fonctionnement hydrique de la culture en prenant toutes les valeurs qui sur-estiment le rendement puis toutes celles qui le sous-estiment, on atteint des fourchettes de variation nettement plus importantes : de 6 à 25 qx en sec, et de 36 à 49 qx en irrigué. Cette constatation souligne qu'il est capital de connaître tous les paramètres avec une bonne précision, même si l'analyse précédente nous a permis d'opérer une certaine hiérarchisation parmi eux.

De plus, nous avons mis en évidence la simulation de mécanismes de compétition entre la croissance des parties végétatives et celle des graines, par ailleurs observés expérimentalement (BLANCHET et GELFI, 1978; PAUL et al., 1979; CALMES et al., 1987), qui conduisent à des comportements différents en sec et en irrigué.

Analysis of Variance Procedure

Les facteurs

Class Level Information

Class	Levels	Values	
IRI	2	0 1	irrigué/sec
RU	5	1.0 1.3 1.6 1.8 2.0	en mm/cm
PROF	8	40 60 80 100 120 140 160 180	en cm
RO	3	60 80 100	en % de la C.C.

Number of observations in data set = 2335

Dependent Variable: RDT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	239	34704309.55	145206.32	42.45	0.0
Error	2095	7165865.17	3420.46		
Corrected Total	2334	41870174.72			

R-Square	C.V.	Root MSE	RDT Mean
0.828855	27.21276	58.48470	214.916488

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
IRI	1	26471646.99	26471646.99	7739.21	0.0
RU	4	539886.05	134971.51	39.46	0.0001
IRI*RU	4	128163.37	32040.84	9.37	0.0001
PROF	7	4160511.40	594358.77	173.77	0.0001
IRI*PROF	7	755198.54	107885.51	31.54	0.0001
RU*PROF	28	33928.00	1211.71	0.35	0.9993
IRI*RU*PROF	28	275227.73	9829.56	2.87	0.0001
RO	2	1026035.36	513017.68	149.98	0.0001
IRI*RO	2	19191.34	9595.67	2.81	0.0607
RU*RO	8	333730.66	41716.33	12.20	0.0001
IRI*RU*RO	8	27636.29	3454.54	1.01	0.4261
PROF*RO	14	637749.15	45553.51	13.32	0.0001
IRI*PROF*RO	14	100911.56	7207.97	2.11	0.0093
RU*PROF*RO	56	100004.14	1785.79	0.52	0.9987
IRI*RU*PROF*RO	56	94488.98	1687.30	0.49	0.9994

Tableau 14 Analyse de variance sur le rendement

(Montpellier)

Le fonctionnement du modèle venant d'être analysé, il est à présent important de tester son comportement vis à vis des données d'entrée qui sont en nombre relativement limité :

Entrées journalières climatiques : apports d'eau, ETP Penman et températures.

Entrée journalière biologique : l'indice foliaire provenant du modèle de croissance de SOYGRO.

Entrées sol : humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement, la densité apparente, le taux d'argile, la profondeur du sol et l'état de la réserve au semis.

Nous avons basé notre analyse de sensibilité sur la variation de 5 facteurs :

- . l'année (10 ans de 1976 à 1985)
- . l'alimentation hydrique (sec et irrigué : 360mm)
- . la réserve utile unitaire (de 1 à 2mm/cm de sol)
- . la profondeur du sol (de 40 à 180 cm)
- . l'état de la réserve au semis (de 60 à 100% de la capacité au champ)

Par ailleurs, nous nous sommes placés à Montpellier avec variété, date et densité de semis adéquates. Cela nous a conduit à réaliser 2400 simulations, que nous avons traitées par une analyse de variance multifactorielle pour laquelle les années constituaient les répétitions. Nous avons ainsi analysé 3 variables agronomiques : le rendement, l'indice foliaire maximal et la production de matière sèche (tableau 14 et annexe 8). Cet outil statistique nous permet de comparer la variation interannuelle (encadré) avec la variation inter-facteur de la variable analysée ($F = \text{carré moyen inter-facteur} / \text{carré moyen interannuel}$) et nous donne une estimation des interactions entre les facteurs.

Nous constatons, en premier lieu, que l'effet année est toujours beaucoup plus faible que l'effet des facteurs, pris dans leur ensemble (F model très supérieur à 1) ou individuellement.

Grâce à la valeur de F , nous pouvons classer les facteurs et comparer les 3 analyses (pour Montpellier) :

classement des facteurs limitants	RDT	LAI	MS
1	irrigation	irrigation	irrigation
2	profondeur	rés.initiale	rés.initiale
3	rés.initiale	profondeur	profondeur
4	ruu	ruu	ruu

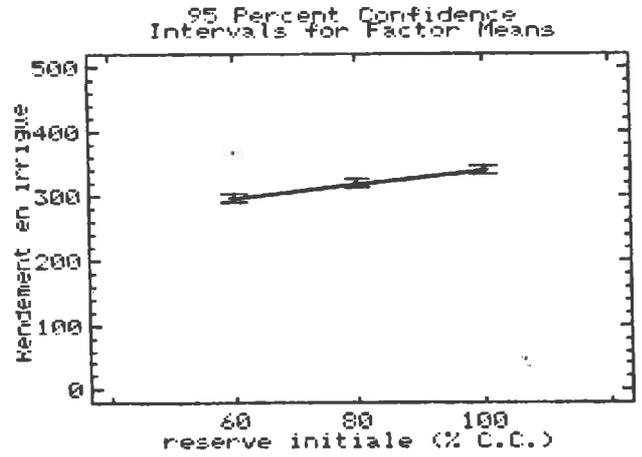
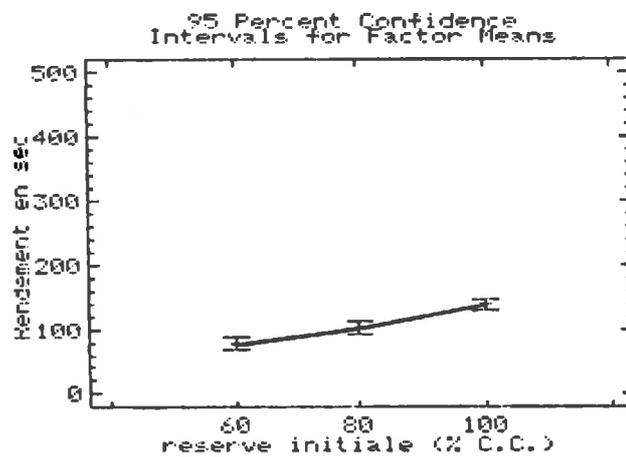
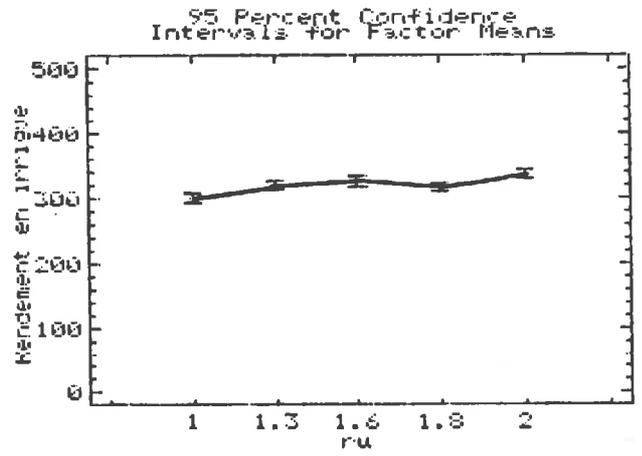
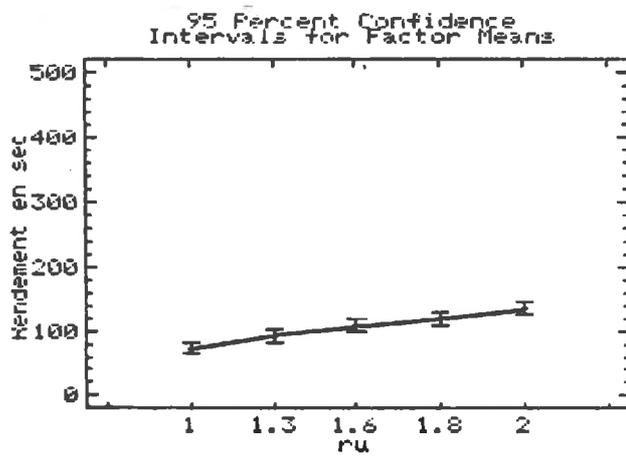
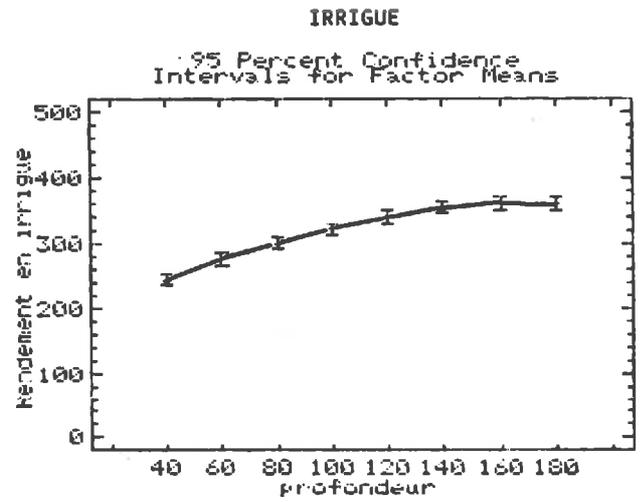
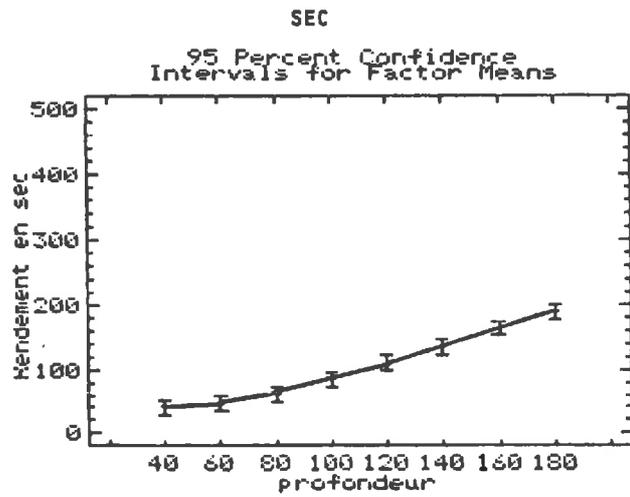


Figure 61: Illustration de l'analyse de variance

Cette analyse chiffrée est complétée par la série de graphiques 61, qui montrent pour les 2 conduites hydriques, la variation de rendement (avec un intervalle de confiance de 95%) résultant de la variation des facteurs .

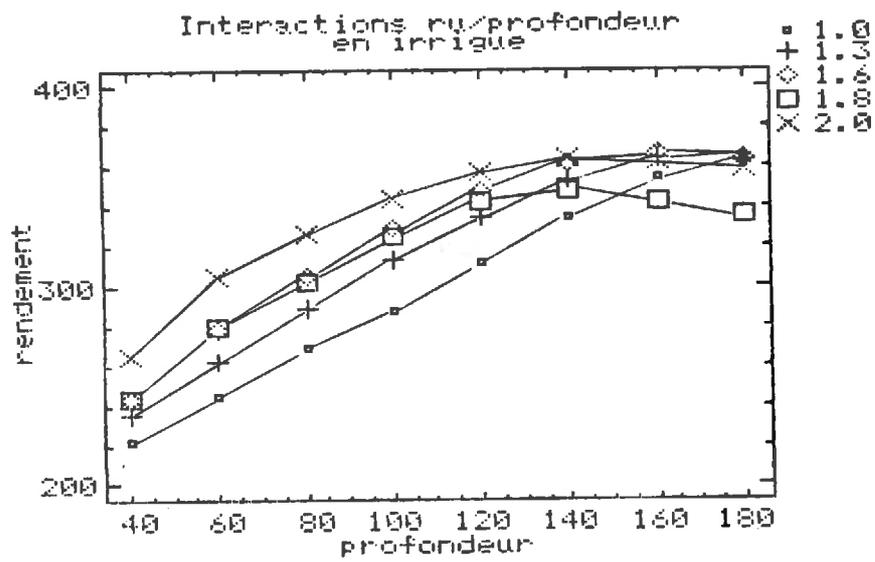
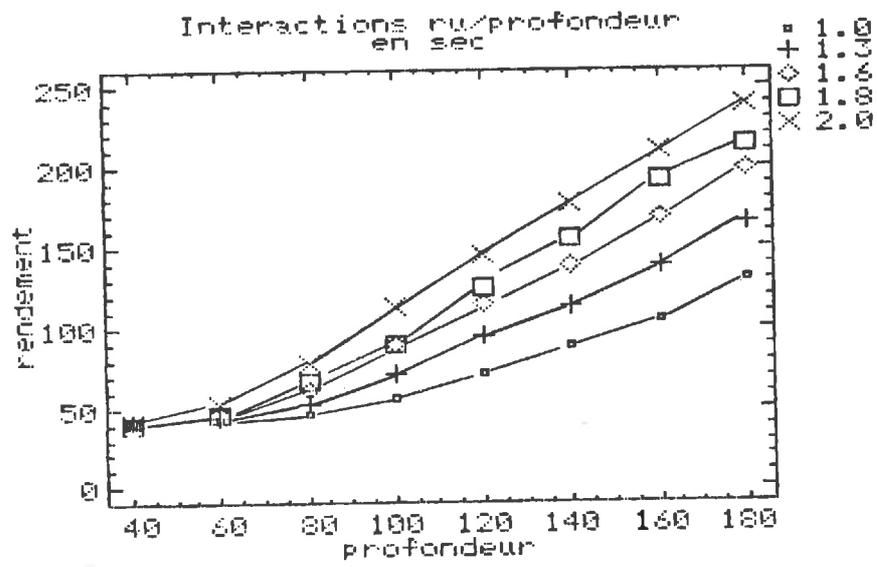
Il n'est pas surprenant que le facteur irrigation arrive en tête compte-tenu du site choisi et des niveaux d'alimentation hydrique très tranchés. En revanche, le rôle joué par la ruu est original par rapport à des bilans hydriques classiques tels celui de CHOISNEL (1985; LAGOUARDE et CHOISNEL, 1989), ce qui s'explique par la prise en compte de la croissance racinaire qui fait qu'il n'y a pas compensation entre profondeur et réserve utile. On notera également le rôle déterminant de la réserve initiale, qui va jouer davantage sur la croissance végétative (LAI) que sur la mise en place du rendement. Cela semble assez logique, compte-tenu du profil d'humidité initiale choisi (schéma 52).

Intéressons-nous à présent aux interactions entre facteurs.

L'ensemble des deux facteurs profondeur X ruu définit le facteur pédologique, et l'on constate que la variation due à ce facteur pédologique est significativement négligeable devant la variation liée aux autres facteurs, y compris l'année. Mais cette analyse en terme de variation ne signifie pas que les gains de rendement dus à l'amélioration du contexte pédologique soient négligeables. On constate, en effet, que sur l'exemple choisi ces gains peuvent atteindre 20 qx en sec et 15 qx en irrigué (figures 62). Toutefois, on observe une certaine inertie du rendement pour les sols superficiels en sec et les sols profonds en irrigué, ces derniers pouvant même provoquer de légères pertes s'il sont associés à une forte ruu (compétition feuilles/graines).

Par ailleurs, on constate qu'il n'y a pas d'interaction significative entre irrigation et réserve initiale, sans doute parce que le schéma d'irrigation introduit dans la simulation (et qui correspond aux pratiques culturales) intervient davantage en fin de cycle. Pour les mêmes raisons, les interactions ruu X irrigation ou ruu X irrigation X rés. initiale, quoique non significatives, tendent à montrer qu'une faible profondeur peut être compensée par une irrigation ciblée sur la fin du cycle. Cela confirme que, dans le modèle, le facteur profondeur jouera sur la mise en place du rendement, ce qui l'oppose au facteur réserve initiale.

Il faut toutefois préciser que ce facteur "réserve initiale" est intimement lié à la date de semis et, compte-tenu de la compétition feuilles/graines simulée par le modèle, il ne semble pas toujours souhaitable que la réserve soit remplie au semis. Ce qui constitue un argument pour retarder les semis en année humide, quand se posent des problèmes de pénétration dans les parcelles.



Figures 62 Effet pédologique

En résumé, l'analyse du comportement du modèle par rapport aux données d'entrée a mis en évidence les points suivants :

- . la variation de rendement (en dehors des aspects phytosanitaires et d'alimentation azotée non pris en compte) provient essentiellement des effets conjugués irrigation x réserve initiale x année
- . le rôle de la réserve utile se trouve minimisé par la prise en compte de la croissance racinaire
- . la réserve initiale intervient surtout en début de cycle sur la mise en place du feuillage et sur la production de biomasse, tandis que
- . la profondeur joue en fin de cycle et peut être compensée par des irrigations adéquates.

Pour éviter toute confusion, nous appellerons SOYAMET (SOYGRO adapté à l'Agrométéorologie), le modèle SOYGRO dans lequel le compartiment hydrique de RITCHIE a été remplacé par le modèle que nous venons de présenter.

3ème PARTIE

VALIDATION DU MODELE DE SIMULATION DE CULTURE MIS AU POINT SON INTERET DANS UNE PROBLEMATIQUE AGROMETEOROLOGIQUE

Nous tenterons, dans cette partie finale, d'évaluer le modèle SOYAMET par rapport aux objectifs agrométéorologiques que nous nous sommes fixés, et en particulier l'étude des potentialités agricoles.

expérimentations		mesures effectuées			
objet	responsable des mesures	LAI	MS couvert	MS par organe	bilan hydrique
réponse spectrale des cultures en rang INRA-Avignon	F. BARET 1987 L. PREVOT 1988 N. BRISSON 1988	X X	X X	X X	X
croissance des organes reproducteurs de soja INRA-Toulouse	A. BOUNIOLS J. COLSON 1988			X	
essais irrigation CETIOM-Montélimar	N. BRISSON 1987				X
essais pilotage irrigation CNABRL-Nîmes	M. PANINE 1988 M. LEVASSEUR N. BRISSON 1988	X	X	X	X
variabilité intra-parcellaire INRA-Toulouse	J. PUECH 1986 1988				X X

Tableau 15 : suivis en cours de culture utilisés pour la validation

		TOULOUSE			NIMES	AVIGNON
		85	86	87	87	87
WEBER	obs	02 juil	25 juin	29 juin	21 juil	05 août
	sim	27 juin	24 juin	21 juin	18 juil	29 juil
KINGSOY	obs	06 juil	02 juil			
	sim	03 juil	03 juil			
172-16	obs		27 juin	30 juin		
	sim		28 juin	23 juin		

tableau 16 : COMPARAISON DES DATES DE FLORAISON OBSERVEES ET SIMULEES

		TOULOUSE			AVIGNON
		85	86	87	87
WEBER	obs	15 sept	01 oct	15 sept	20 sept
	sim	18 sept	27 sept	12 sept	25 sept
KINGSOY	obs	15 oct	08 oct		
	sim	12 oct	12 oct		
172-16	obs		01 oct	10 sept	
	sim		03 oct	15 sept	

tableau 17 : COMPARAISON DES DATES DE FIN DE CYCLE (R7 ou R8) OBSERVEES ET SIMULEES

E. VALIDATIONS

Pour vérifier la fiabilité de l'outil de simulation précédemment mis au point, nous présentons une série de comparaisons entre des valeurs observées ou mesurées et des valeurs simulées par le modèle, dans les mêmes conditions agronomiques, sur les aspects de phénologie et de croissance, sur le bilan hydrique et enfin sur le rendement et ses composantes.

Ce travail a nécessité la mise en place de suivis expérimentaux spécifiques et a pu être complété par la mise à notre disposition de jeux de données élaborés sur des cultures de soja pour des besoins différents (tableau 15). Les données ponctuelles concernant la phénologie et les composantes du rendement proviennent des stations INRA de Toulouse et Avignon ainsi que du CETIOM Montélimar et Toulouse.

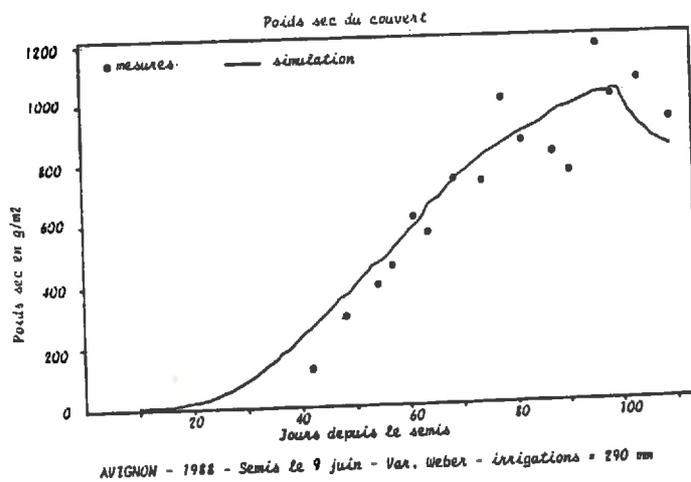
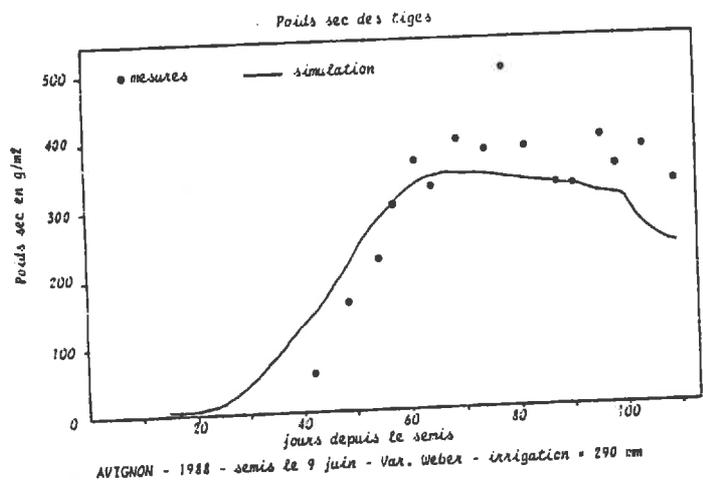
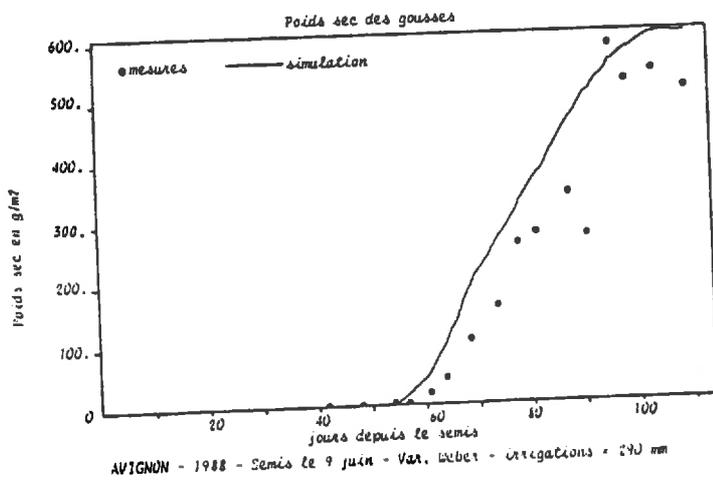
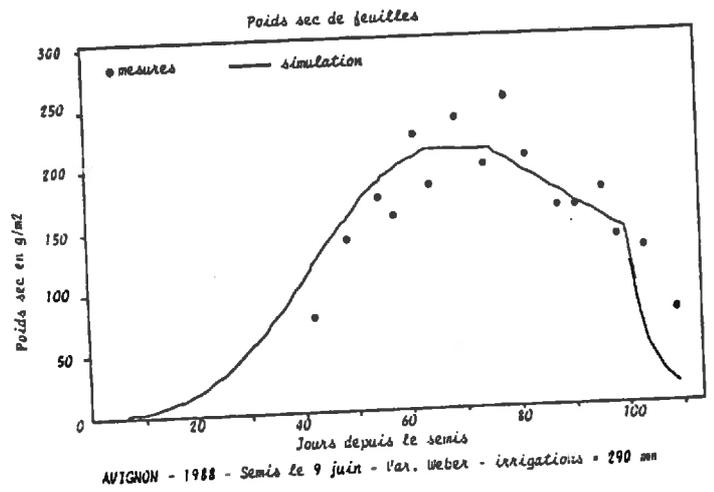
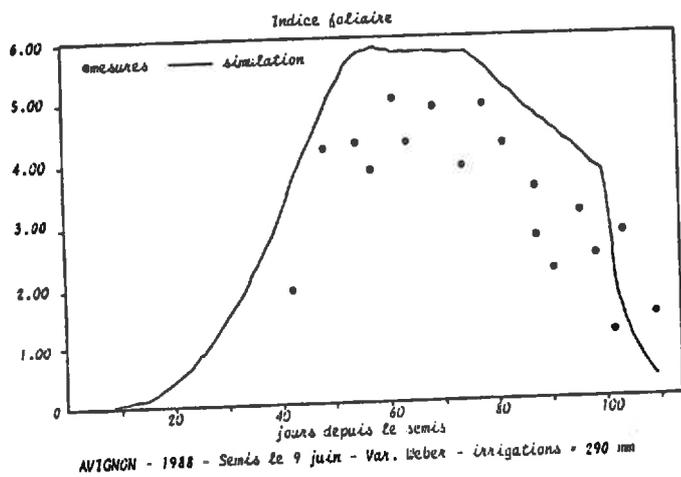
I. VALIDATION DE LA PHENOLOGIE

Les tableaux 16 et 17 montrent que le déroulement du cycle est simulé de façon satisfaisante avec une erreur de 5 jours à la floraison et de 4 jours en fin de cycle, l'erreur calculée étant la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.

Ainsi, les principales étapes que sont la floraison et la maturité physiologique sont respectées, ce qui souligne la pertinence du système de calculs phénologiques proposés par les auteurs du modèle, basé sur deux unités de développement.

Ne disposant pas d'informations suffisantes sur les phases phénologiques intermédiaires, il ne nous a pas été possible de vérifier si le découpage du cycle reproducteur était correct. Or ce découpage est très important pour une bonne simulation de la mise en place des composantes du rendement, il peut par exemple interdire les compensations entre le nombre d'organes et leur poids en dissociant la phase de production des gousses et la phase de remplissage.

Figure 63 Suivi de la croissance par organes (AVIGNON 1988)



II. VALIDATION DE LA CROISSANCE

Il nous a semblé important de vérifier la validité des simulations :

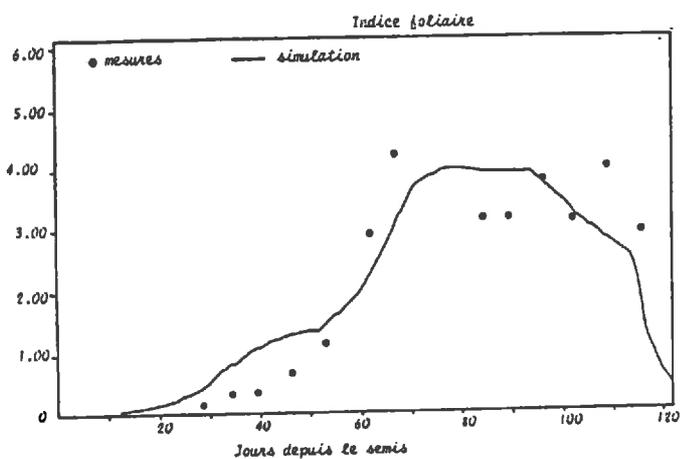
- . de l'évolution de la biomasse totale, qui est un indicateur du bon fonctionnement du module de photosynthèse dont le rôle est de gérer la production globale d'assimilats.
- . de croissance par type d'organe qui permet de vérifier si la répartition des photosynthétats, ainsi que les remobilisations azotées se font correctement.
- . de l'évolution de l'indice foliaire pour contrôler la conversion de la matière sèche en surface.

L'ensemble des données de validation de croissance est regroupé sur les figures 63 à 67.

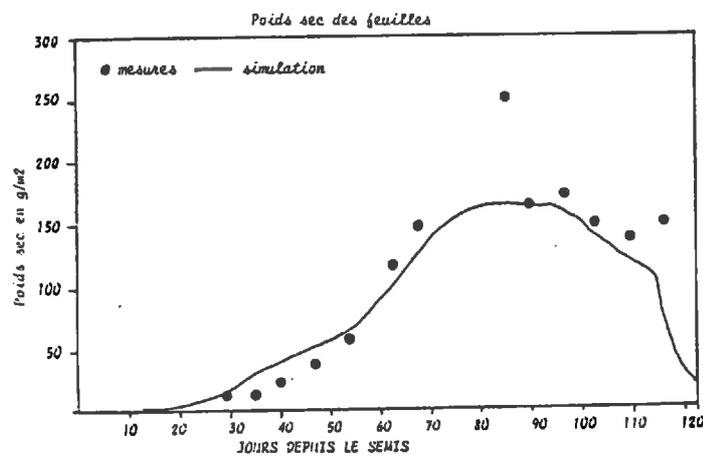
1. Evolution de la biomasse totale

On constate que l'évolution simulée de la biomasse totale respecte bien les points de mesure. En particulier, on note que le modèle prend bien en compte le retard au démarrage constaté expérimentalement en 1987 à Avignon pour la culture la plus précoce, et qui semble provenir d'un défaut de remplissage du réservoir sol au semis. En effet, les suivis de bilan hydrique effectués tous les mois par le CIRAME (Bulletin Mensuel Agroclimatique), sur plusieurs sites proches du site expérimental, montrent qu'au cours du printemps 87 la réserve ne dépassait pas 80% de la capacité au champ, contrairement au printemps 1988 (mesures personnelles complétées par le BMA CIRAME) où elle était largement reconstituée. Cela confirme le rôle important du facteur "réserve initiale".

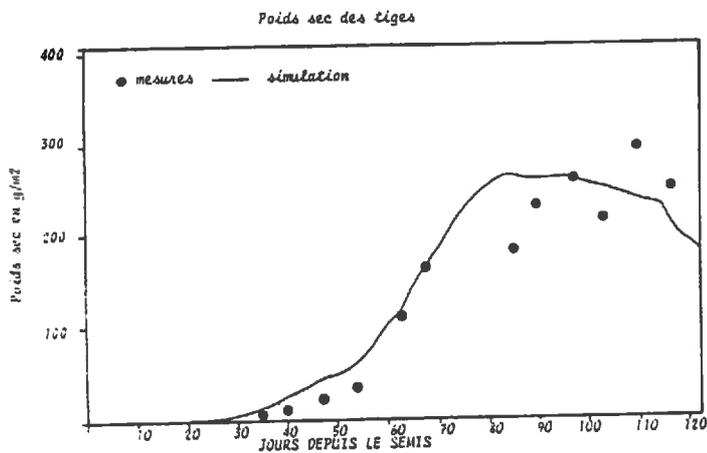
Figure 64 Validation croissance par type d'organe, semis précoce (AVIGNON 1987)



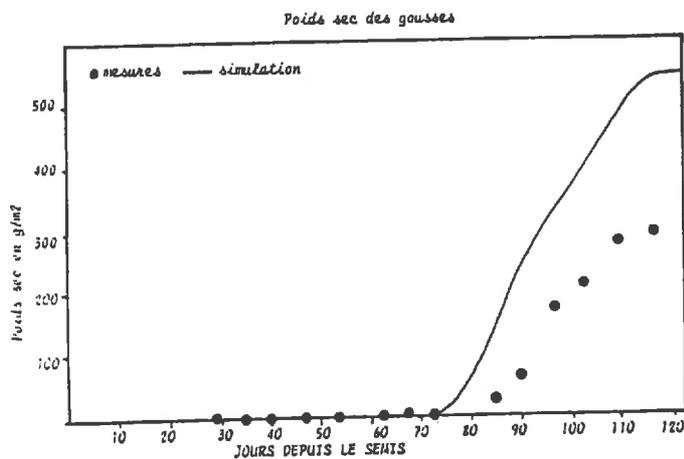
AVIGNON 1987 - Semis le 13 mai - Var. Weber - irrigations = 300 mm



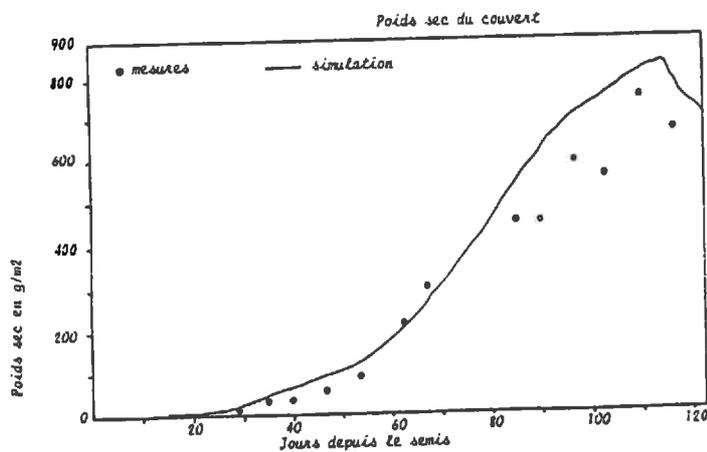
AVIGNON 1987 - Semis le 13 mai - var. Weber - irrigation 300 mm



AVIGNON 1987 - semis le 13 mai - var. Weber - irrigation 300 mm

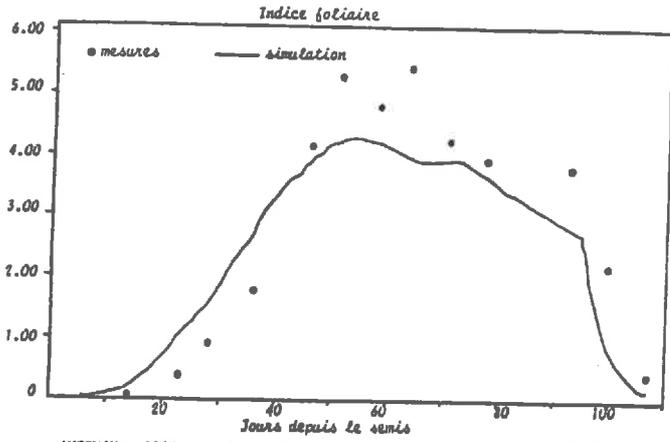


AVIGNON 1987 - Semis le 13 mai - var. Weber - irrigation 300 mm

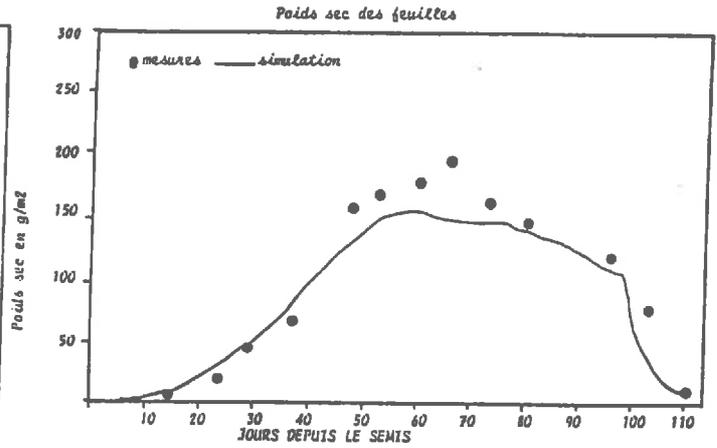


AVIGNON 1987 - Semis le 13 mai - Var. Weber - irrigation = 300 mm

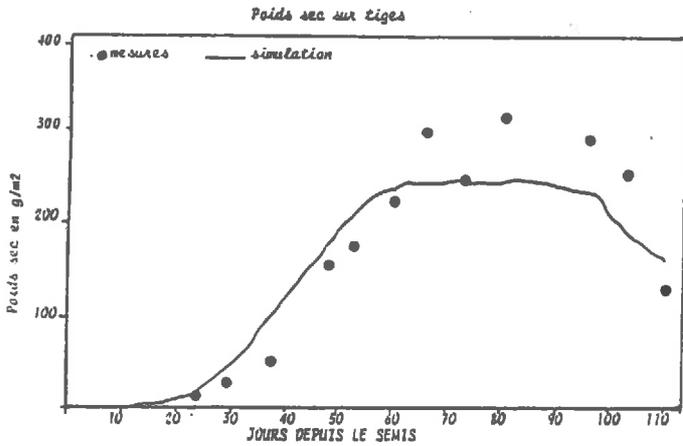
Figure 65 Validation croissance par type d'organe, semis tardif (AVIGNON 1987)



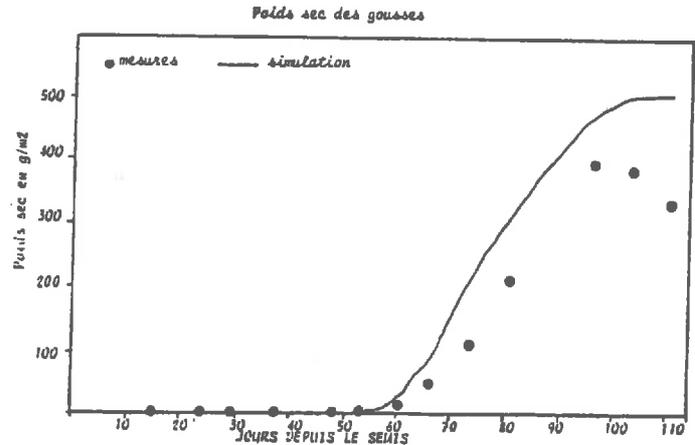
AVIGNON - 1987 - Semis le 23 juin - var. Weber - irrigations = 300 mm



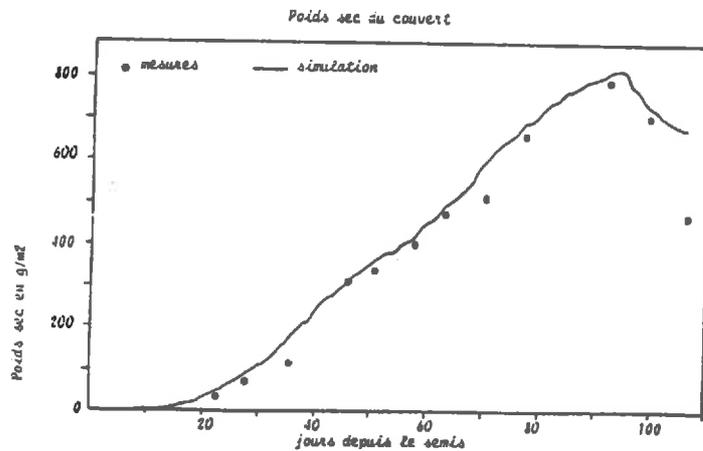
AVIGNON 1987 - semis le 23 juin - var. Weber - irrigation 300 mm



AVIGNON 1987 - Semis le 23 juin - var. Weber - irrigation 300 mm



AVIGNON 1987 - Semis le 23 juin - var. Weber - irrigation 300 mm



AVIGNON - 1987 - Semis le 23 juin - var. Weber - irrigations = 300 mm

Figure 66 Validation croissance par type d'organe (NIMES 1988)

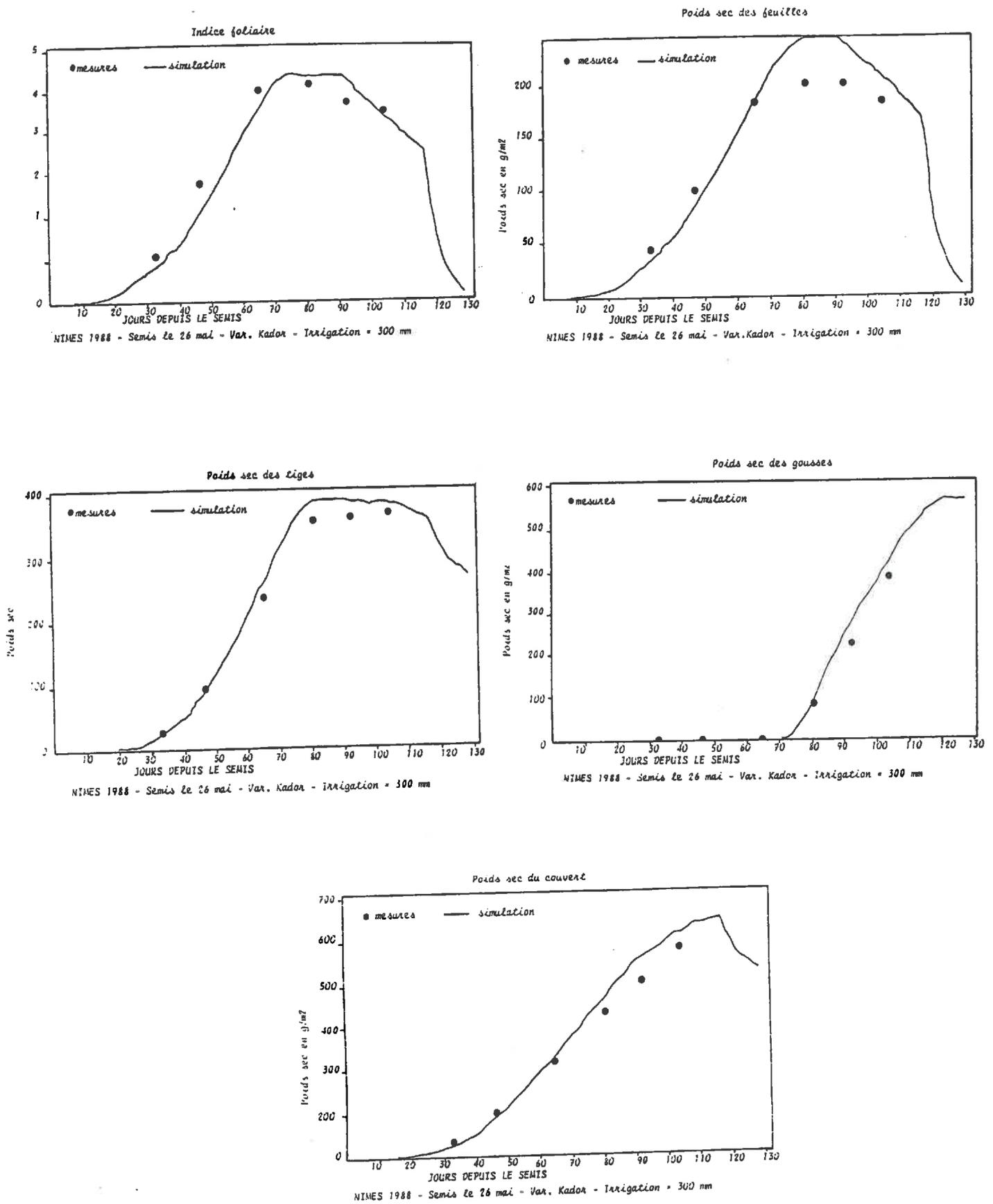
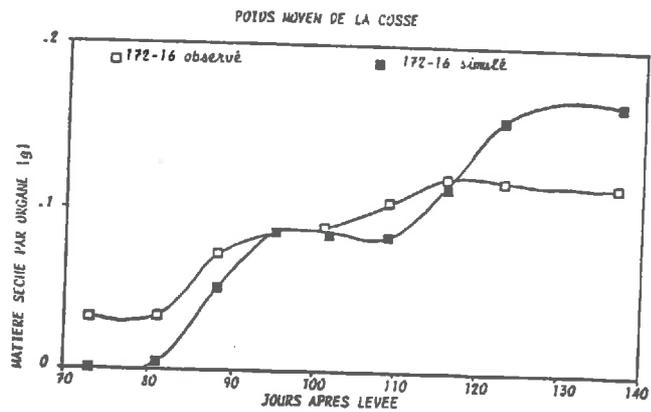
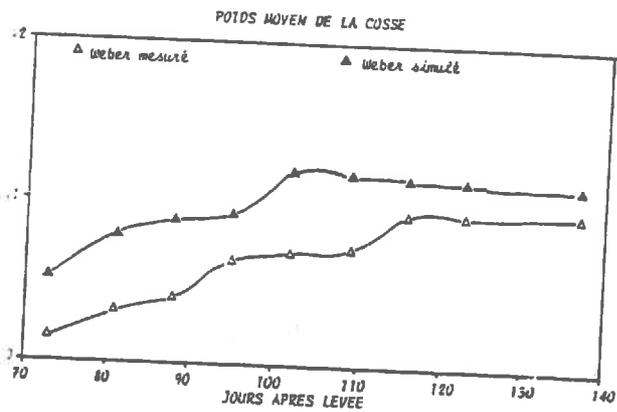
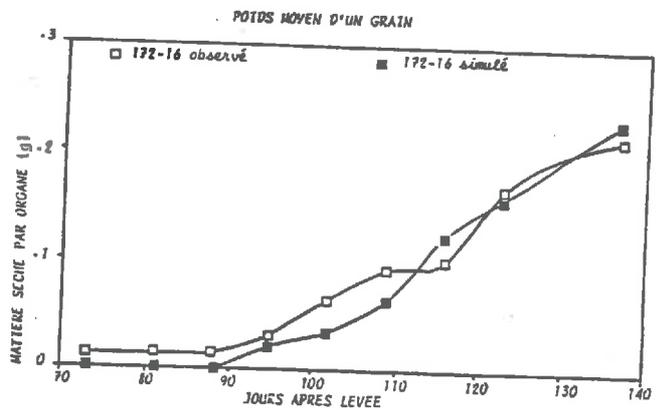
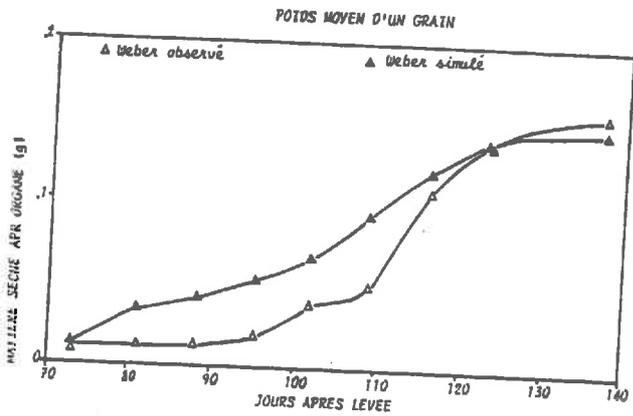
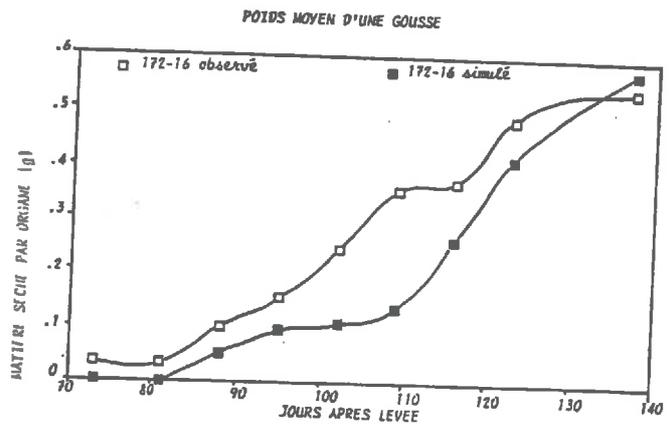
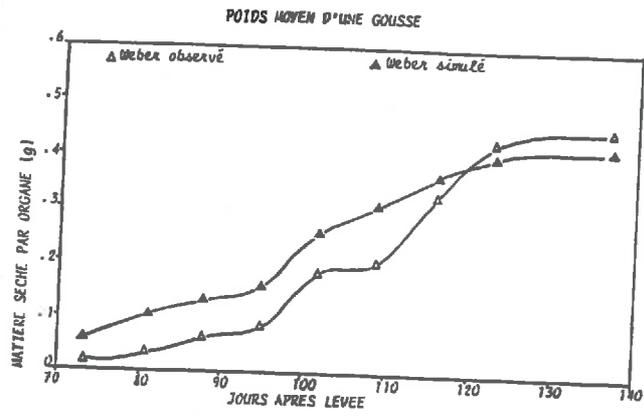


Figure 67 Croissance des organes reproducteurs



2. croissance par type d'organe

A l'échelle du couvert, on constate que la répartition entre tiges, feuilles et gousses est correctement simulée. Il nous semble, en particulier, important que la sénescence foliaire soit bien prise en compte.

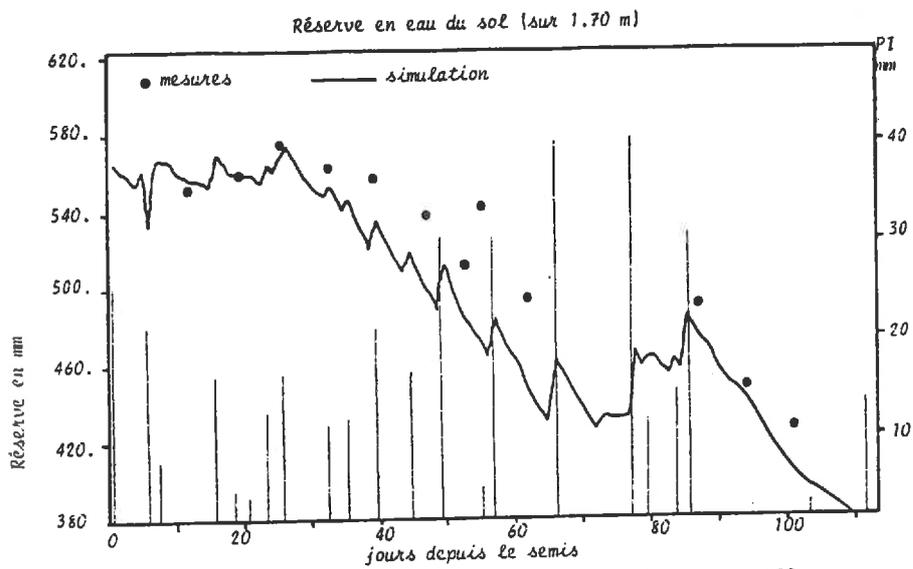
Concernant les organes reproducteurs, cosses et graines représentés sur les figures 67, on s'aperçoit que si la croissance globale de la gousse (cosse+graines) ainsi que celle des graines sont satisfaisantes, en revanche le modèle provoque des décalages dans la croissance de la cosse. On constate, en effet, un départ en croissance trop tardif chez Weber et trop précoce chez 172-16, moyennant quoi l'arrêt de croissance se trouve décalé. Cela souligne l'importance du calage phénologique. Par ailleurs, SOYGRO stoppe la croissance de la cosse au bout de 14 jours et on peut se demander si un paramétrage pondéral ne serait pas mieux adapté.

Sachant que dans le modèle sont faites un certain nombre d'approximations concernant la mise place des graines (voir chapitre A), il est intéressant de remarquer que le poids sec final des graines, c'est-à-dire le rendement, est tout à fait satisfaisant, ce qui signifie que le schéma de limitation source-puits, qui constitue finalement le moteur de cette cinétique est bien simulé.

3. Evolution de l'indice foliaire

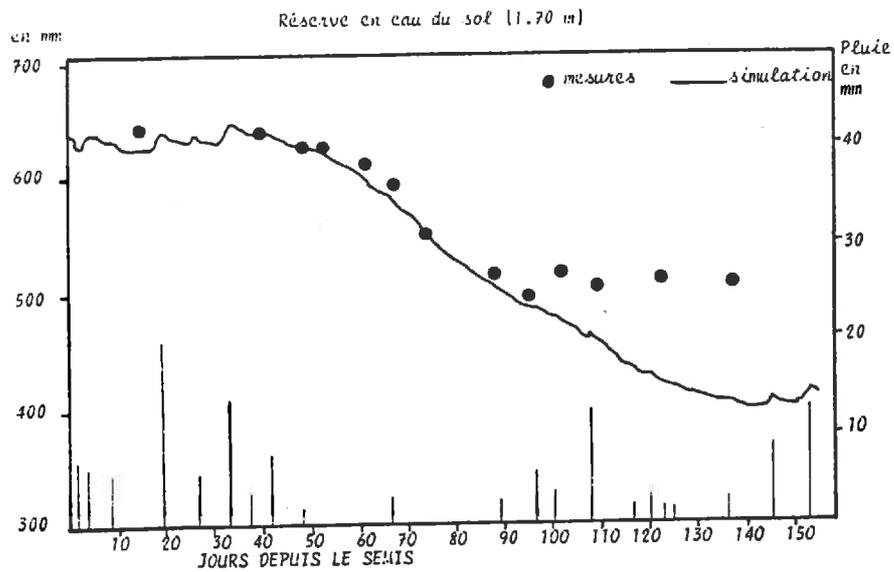
Là encore, le modèle respecte assez bien les suivis expérimentaux. Toutefois, on note qu'une bonne simulation de la croissance pondérale des feuilles n'implique pas toujours l'équivalent en terme d'indice foliaire. On constate, par ailleurs que les mesures de LAI comportent une variabilité importante, ce qui souligne l'aspect délicat de ces mesures, étroitement liées à l'échantillonnage, et nous conduit à prendre avec précaution les données présentées ainsi que les paramètres variétaux liés à l'indice foliaire.

Il peut être intéressant de remarquer que le système foliaire atteint son maximum quand les gousses démarrent leur croissance, ce qui constitue un indicateur phénologique précieux.



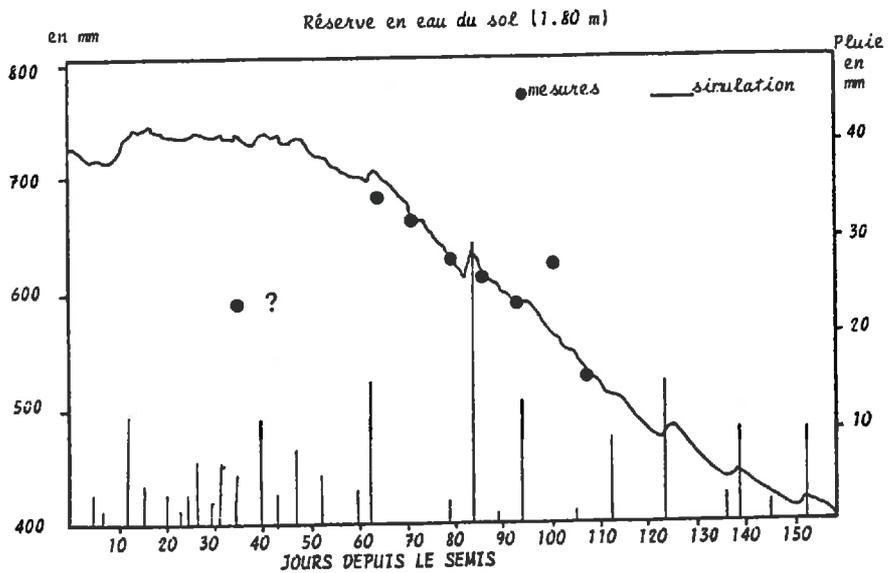
AVIGNON - 1988 - Semis le 9 juin - var. Weber - irrigations = 290 mm
 Les mesures d'humidimètre à neutrons correspondent à la synthèse entre 4 tubes.

Figure 68



TOULOUSE 1986 - Semis le 25 avril - conduite en sec
 Mesures neutroniques : moyenne sur 2 tubes

Figure 69



TOULOUSE 1988 - semis le 4 mai - conduite en sec
 Mesures neutroniques : moyenne sur 5 tubes

Figure 70

III VALIDATION DU BILAN HYDRIQUE

La validation du compartiment hydrique, que nous avons mis au point, a été réalisée par des contrôles de l'état de la réserve en eau sur divers types de sol : à Montélimar sur un sol limono-argileux battant en surface et à Avignon sur un sol argilo-limoneux, tandis que les données de Toulouse proviennent également d'un sol à dominante argileuse. Nous présentons également un essai de validation de la consommation par des mesures de flux (BEARN) réalisées au CNABRL. Par ailleurs, nous avons testé plusieurs types d'alimentation hydrique.

Parmi les 6 courbes présentées (figures 68 à 73) on peut définir deux types de comportements liés à l'état de la réserve au semis.

	site	réserve initiale en % de la capacité au champ
fig. 68	[Avignon 1988.....100% (mesures)
fig. 69		Toulouse 1986.....90% (mesures)
fig. 70		Toulouse 1988.....95% (estimation PUECH)
fig. 71 à 73	Montélimar 1987.....	65 à 70% (mesures)

1. Cas de la réserve remplie (Avignon, Toulouse)

L'alimentation en eau de la culture lors de sa mise en place est correctement reproduite par le modèle, ce qui tendrait à valider les aspects de séparation évaporation-transpiration introduits dans la simulation.

Puis la réduction de réserve, qui intervient de 30 à 50 jours après le semis selon les cas, est également bien simulée. On constate cependant un léger décalage sur le site Avignon 88, qui pourrait provenir d'une sous-estimation des doses d'irrigation apportées (com. pers. du responsable de la culture), sachant que l'objectif des irrigations était d'éviter toute contrainte hydrique. Par ailleurs, le point problématique de la validation du site de Toulouse 88, correspond à une mesure erronée due à une défaillance technique de l'appareil, qui fut changé pour la suite de l'expérimentation (PUECH, com. pers.).

Cependant, dans le cas de Toulouse 86, alors que les mesures montrent une stagnation de la réserve au bout du 100ème jour, le modèle poursuit la réduction jusqu'au 130ème jour. Cela peut provenir d'une sur-estimation de la consommation en fin de cycle dans des conditions sèches, ou à l'inverse d'une sous-estimation des apports d'eau qui alimentent la réserve (remontées capillaires). Pour tenter d'accréditer l'une ou l'autre de ces hypothèses, nous avons à notre disposition les profils hydriques observés, reproduit sur la figure 74.

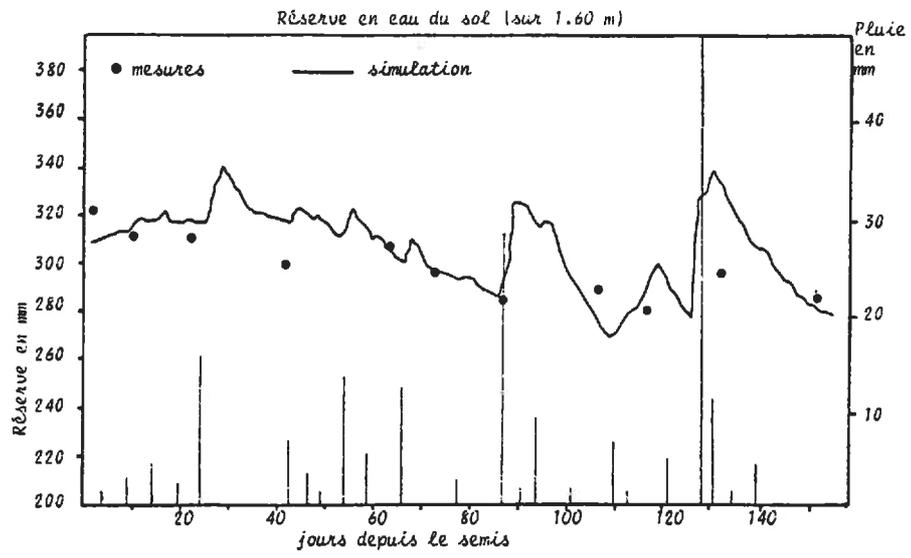


Figure 71

MONTELMAR - 1987 - Semis le 26 avril - l'ar. Weber - en sec
 Les mesures d'humidimètre à neutrons correspondent à un seul tube.

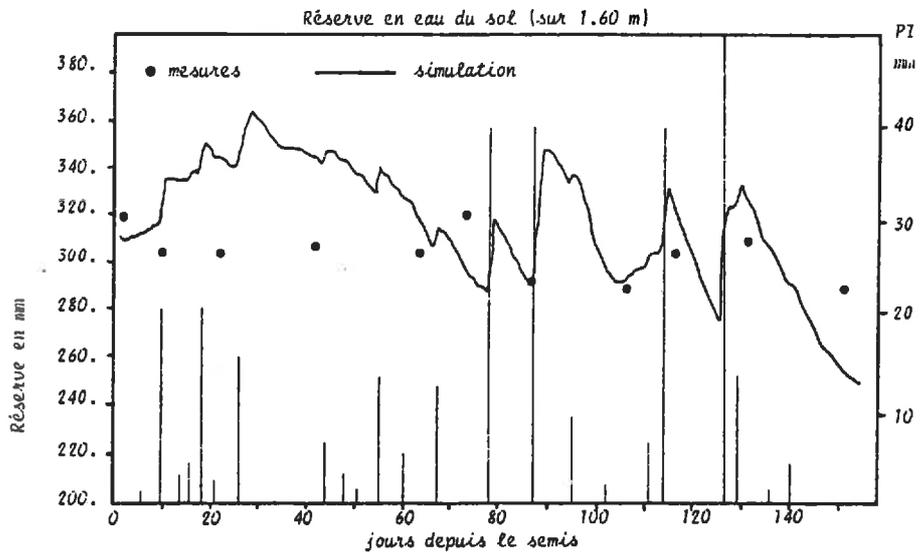


Figure 72

MONTELMAR - 1987 - Var. Weber - irrigations = 140 mm
 Les mesures d'humidimètre à neutrons correspondent à 1 seul tube.

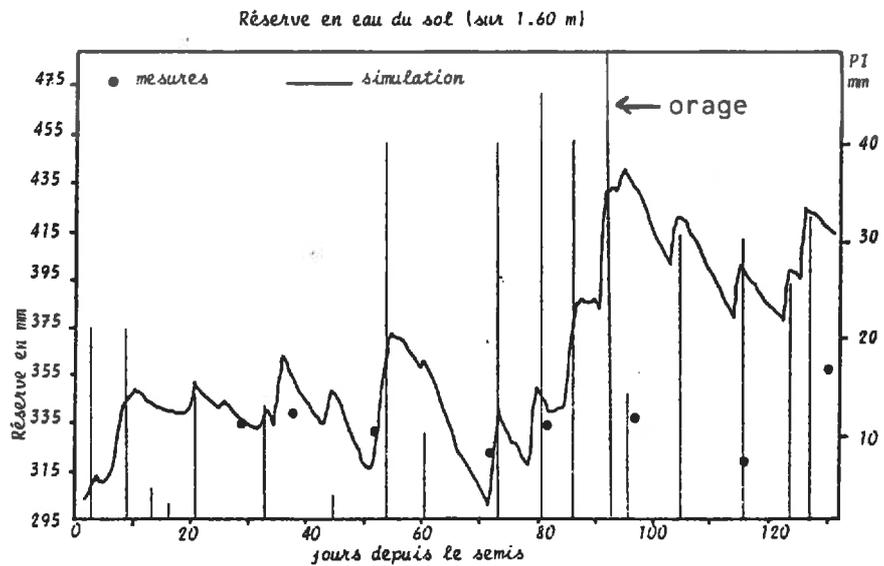


Figure 73

MONTELMAR - 1987 - semis le 23 mai. Var. 172-16 - irrigations = 320 mm
 Les mesures d'humidimètre à neutrons correspondent à la moyenne entre 2 tubes.

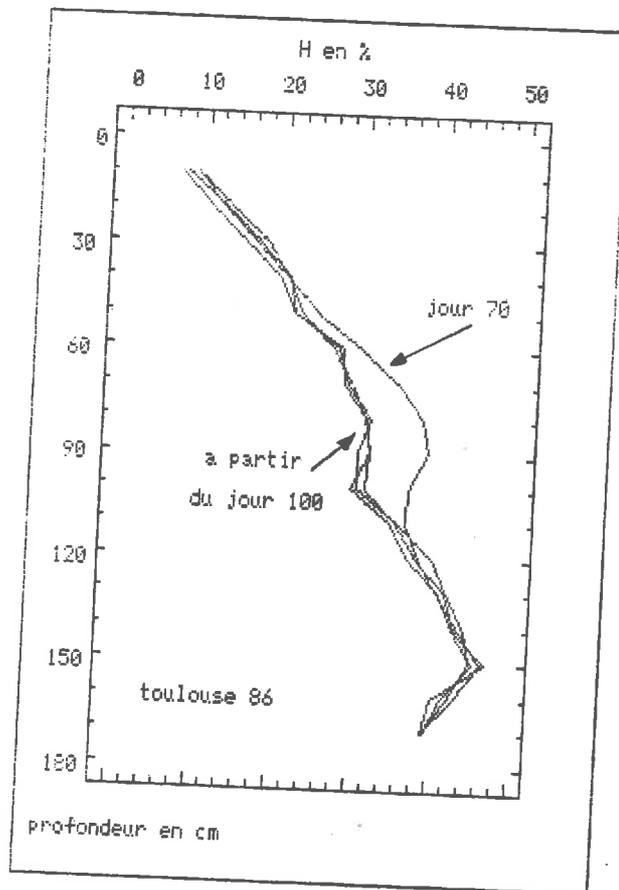


Figure 74 : Evolution du profil hydrique en fin de cycle

Ces profils montrent qu'à partir du 100ème jour, il n'y a aucune évolution et que, en particulier, il n'y a pas compensation des pertes évaporatives par des apports venant du sol sous-jacent. Il semblerait que la culture ait stoppé sa transpiration, ce qui peut suggérer un raccourcissement du cycle en réponse au stress hydrique ou une sénescence foliaire beaucoup plus rapide que celle simulée par le modèle. Ainsi, ce premier niveau d'analyse (les données disponibles ne nous permettant pas d'aller plus loin) tend à mettre en cause la simulation du fonctionnement physiologique plutôt que le module hydrique.

2. cas de la réserve partiellement remplie au semis (Montélimar)

Dans ce cas les mesures révèlent une certaine stabilité de la réserve, traduisant un équilibre entre les pertes par évapotranspiration et les gains qui réalimentent le réservoir. Cet équilibre est relativement bien respecté sur la simulation en sec. En revanche, dans les deux autres cas on observe une tendance à la surestimation, comme si les apports d'eau n'avaient pas pénétré le sol. Cela est très net pour l'orage du jour 124 (semis d'avril) ou 92 (semis de mai) dont une bonne partie des 55mm tombés ont été évacués par ruissellement, ce que n'a pas intégré le modèle. En effet, les phénomènes de ruissellement de surface et d'interception des pluies par l'écran végétal ne sont pas modélisés, de sorte que le modèle a tendance à surestimer les apports d'eau efficaces, en particulier sur un sol battant.

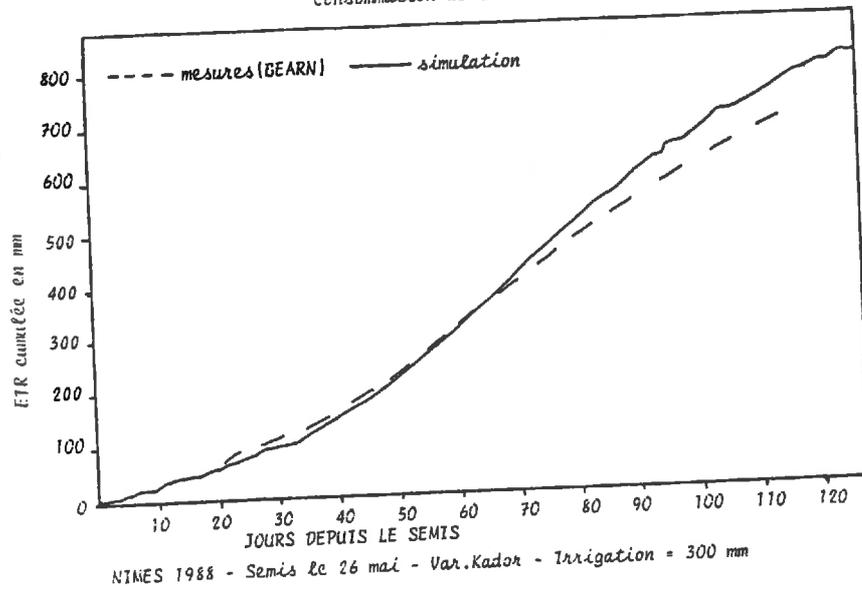


Figure 75

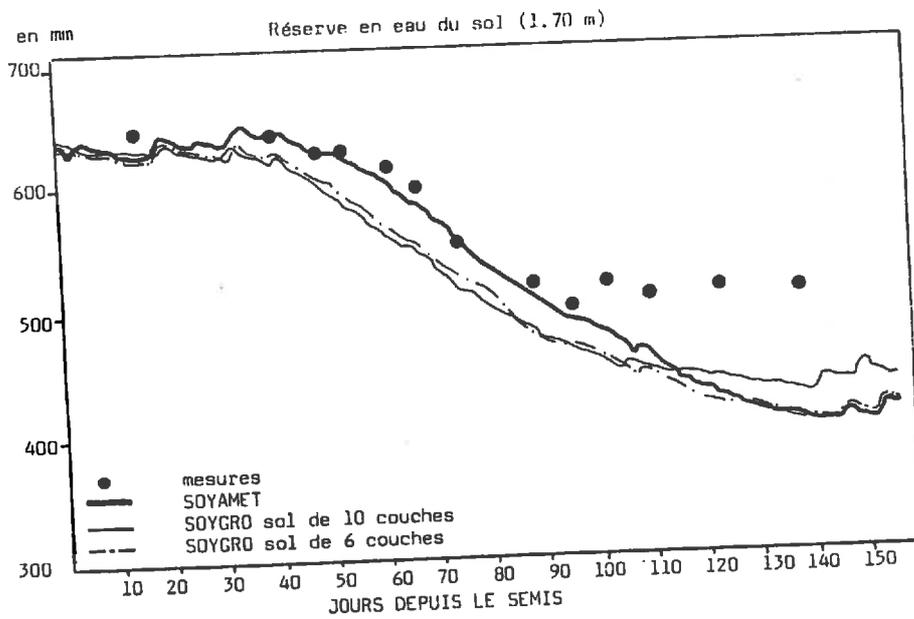


Figure 76 : Comparaison SOYAMET/SOYGRO en conditions sèches
TOULOUSE 1986

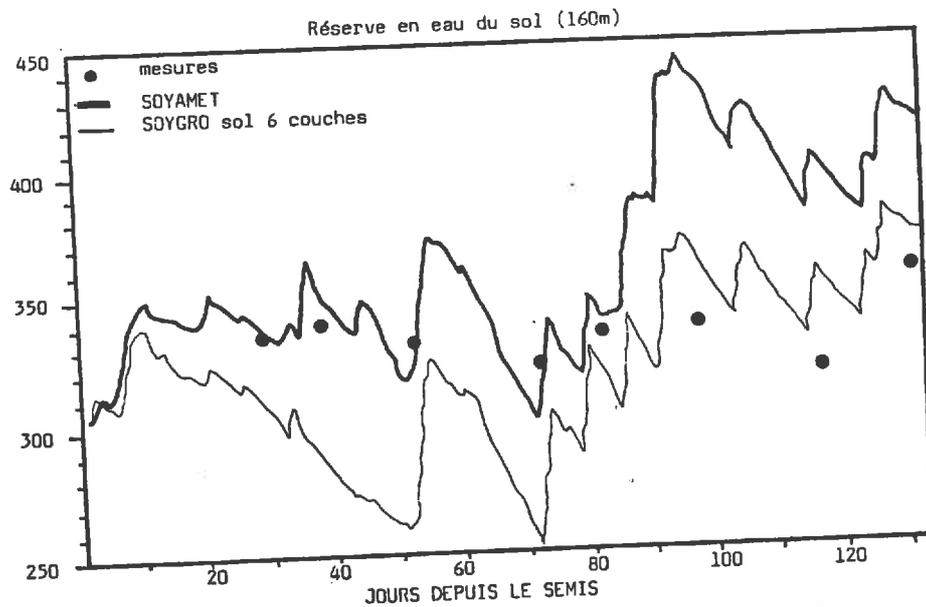


Figure 77 : Comparaison SOYAMET/SOYGRO en conditions irriguées
Montélimar 1987

3. contrôle de la consommation

Le contrôle de la consommation en eau, qui a pu être réalisé sur la parcelle de Nîmes (figure 75), met en évidence une légère sur-estimation de l'ETR en fin de cycle, qui aboutit à une différence de consommation totale de 50 mm. Cette sur-consommation peut être attribuer à une sur-estimation du réservoir (due à la non prise en compte du ruissellement) ou à une sur-estimation de l'évapotranspiration maximale par le biais de la fonction $ETPO/ETP = f(LAI)$.

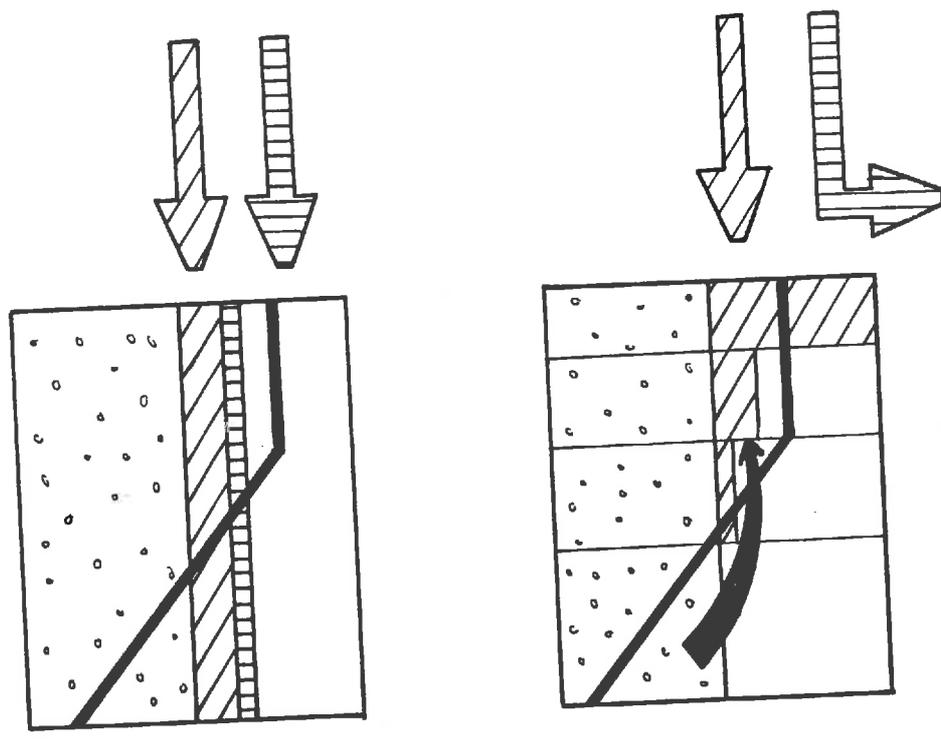
4. comparaison avec le modèle de Ritchie

Ayant mis en évidence certaines faiblesses du modèle hydrique, nous avons comparé, dans deux cas problématiques, le modèle SOYAMET avec le modèle SOYGRO dans lequel est incorporé le modèle hydrique de RITCHIE (avec ETP Penman). Les caractéristiques du sol sont identiques dans les deux cas, pour SOYAMET le sol est considéré comme un réservoir homogène alors que pour SOYGRO ce réservoir est scindé en plusieurs couches.

. observations

Dans le cas de Toulouse 86 (figure 76), on constate que la simulation de SOYGRO n'est pas meilleure que celle de SOYAMET, avec même une tendance à sous-estimer la réserve. Toutefois, si l'on multiplie le nombre de couches, on constate que la diminution du niveau de réserve s'arrête plus rapidement.

Dans le cas de Montélimar (figure 77), la prise en compte des phénomènes de ruissellement dans SOYGRO entraîne une meilleure simulation de la fin du cycle, ce qui confirme notre hypothèse. Cependant, en début de cycle l'estimation de SOYGRO est, à nouveau, trop faible.



SOYMET

SOYGR0

-  profil racinaire = maximum d'absorption
-  réserve au jour J0
-  pluie au jour J1
-  pluie au jour J2
-  remontées capillaires

Figure 78 : Comparaison du fonctionnement hydrique de SOYGR0 et SOYMET

. tentative d'explication

Le schéma 78 tente d'expliquer les différences observées entre les deux modèles. Partant d'un même état du profil hydrique au jour J0, une pluie au jour J1 est répartie de façon homogène selon SOYAMET, alors que SOYGRO remplit les couches successivement. Cela entraîne, chez SOYGRO, la présence d'une quantité d'eau plus importante dans les couches superficielles, justement là où la plante est plus efficace vis à vis de l'absorption à cause de la répartition racinaire, et conduit à une consommation plus importante. S'ajoute à ce phénomène les apports par remontées capillaires.

Si, au jour J2, une nouvelle pluie intervient, elle sert à reconstituer la réserve dans SOYAMET tandis que dans SOYGRO, la première couche étant saturée, elle est évacuée par ruissellement.

Par ailleurs, les remontées capillaires ne concernent que les 4 premières couches, indépendamment de leur épaisseur. Si ces 4 couches correspondent à une faible épaisseur (cas du sol divisé en 10 couches), le phénomène s'arrête rapidement et l'alimentation en eau, donc la transpiration liée à ces couches diminue, ce qui réduit globalement la consommation.

Cette comparaison tend à conforter les choix qui ont été faits au niveau du module hydrique, justifiés, à l'origine, par un souci de simplification des données d'entrée et de meilleure maîtrise des paramètres. Elle montre aussi l'intérêt d'incorporer la simulation des phénomènes de ruissellement.

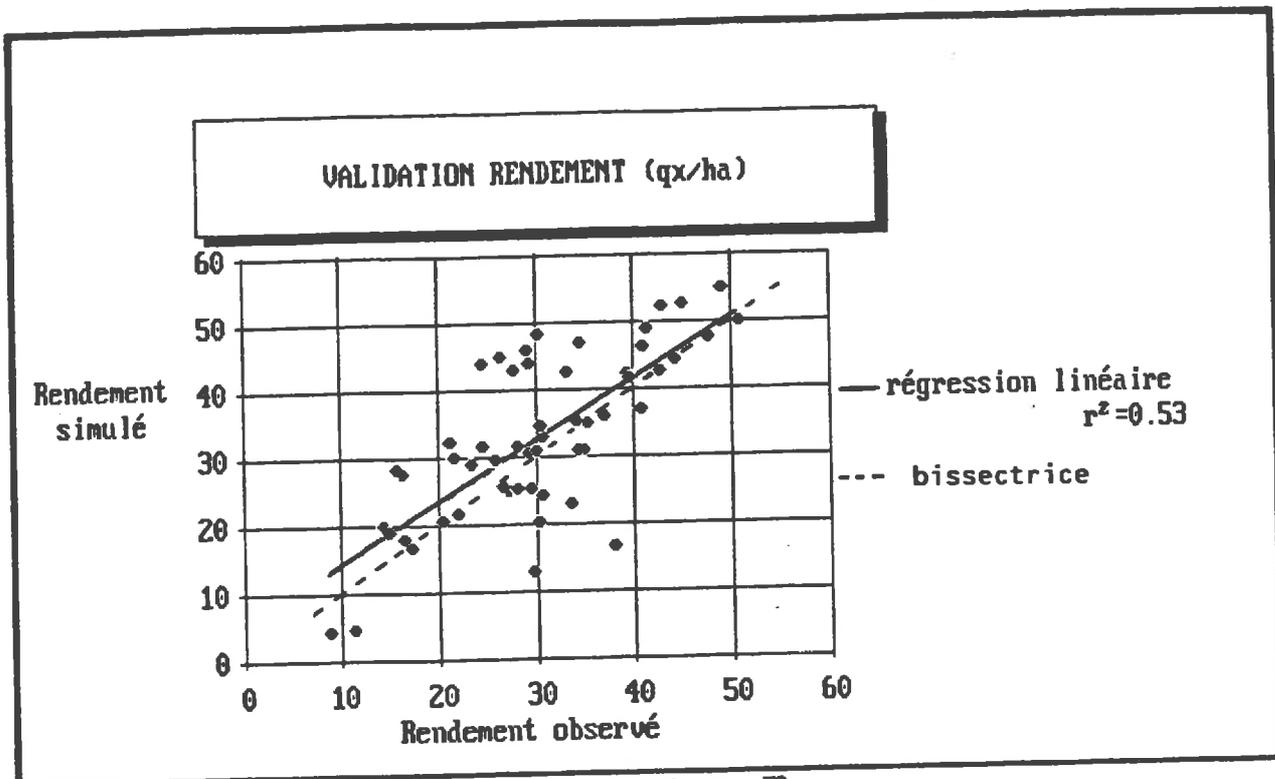


Figure 79

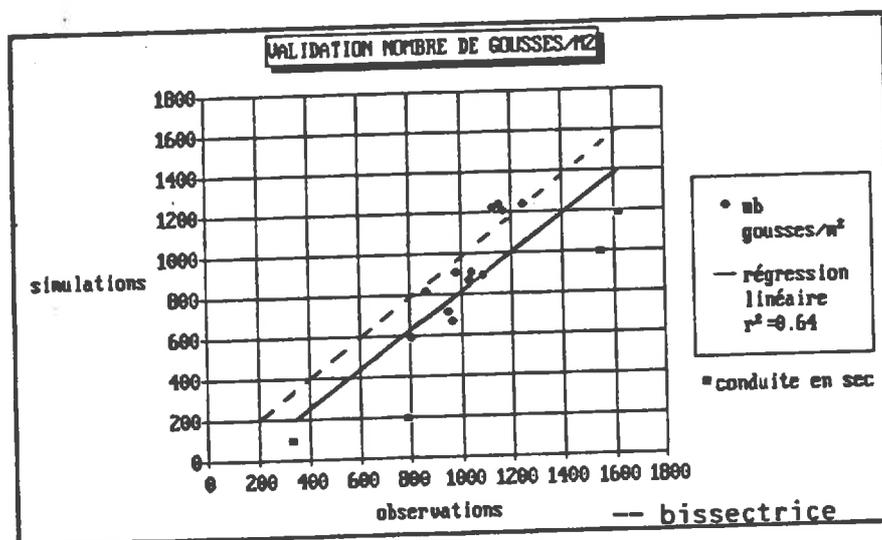


Figure 81

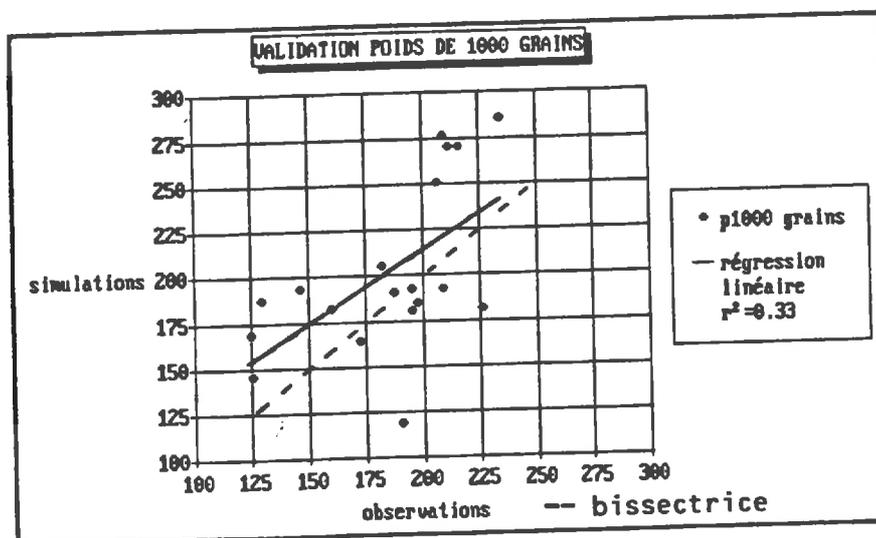


Figure 82

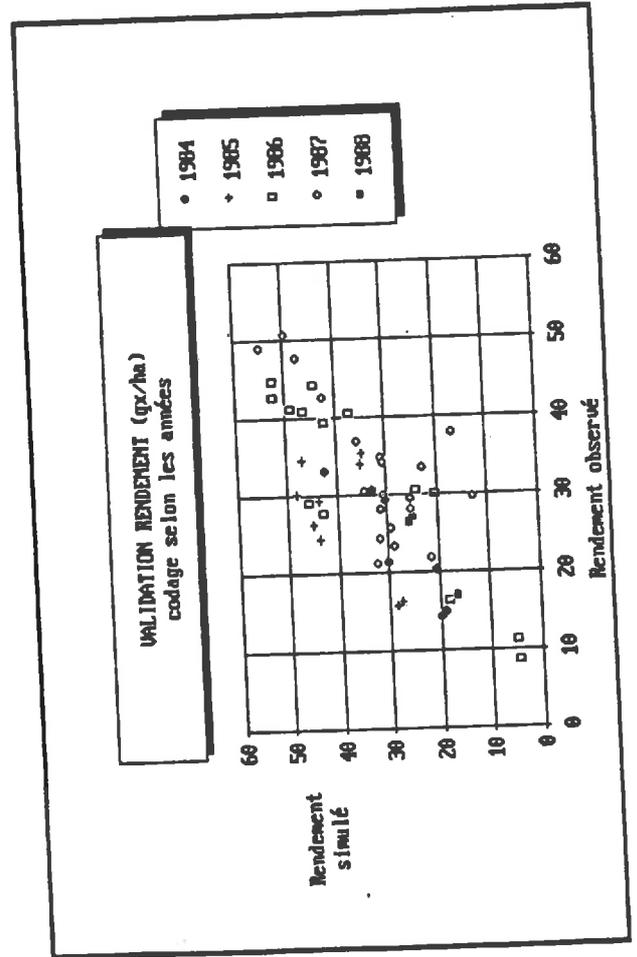
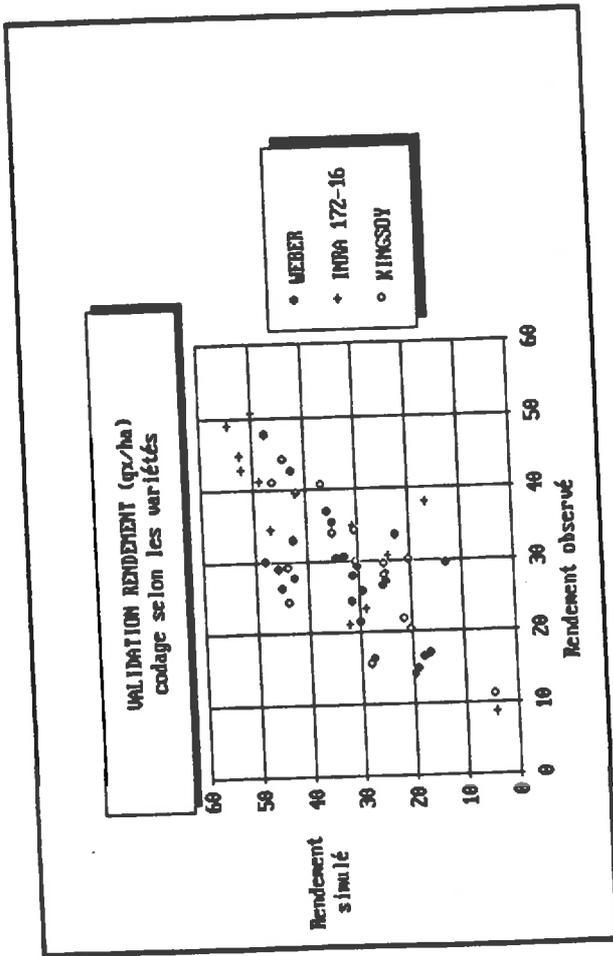
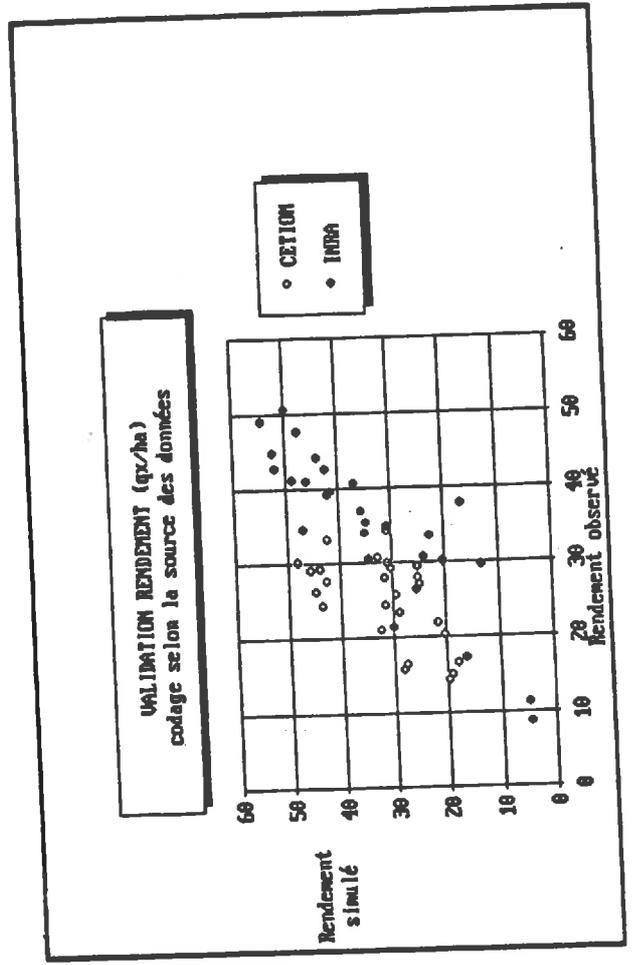
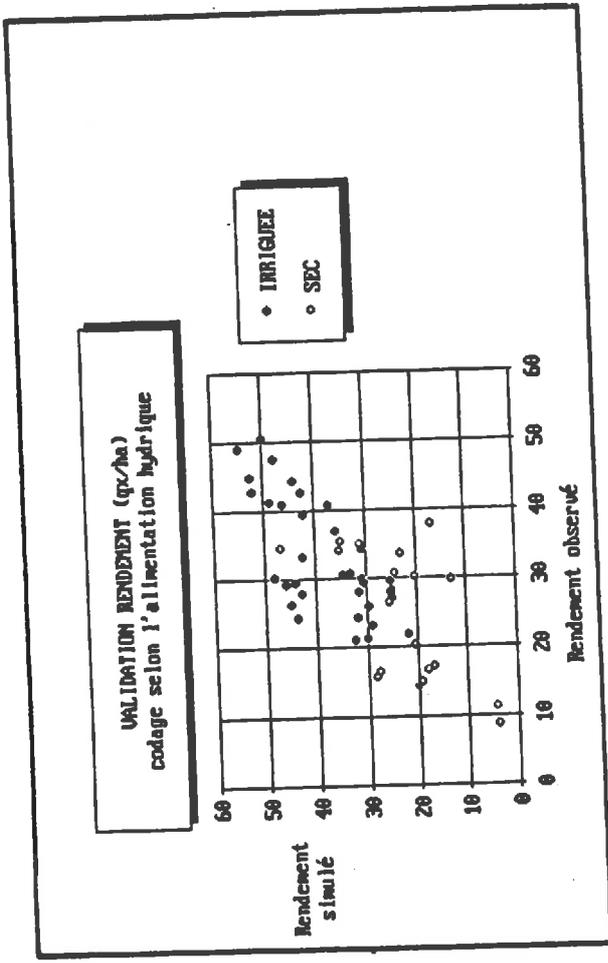
IV VALIDATION DU RENDEMENT ET DE SES COMPOSANTES

Nous avons pu réunir une quantité de données suffisamment importante pour évaluer les tendances de SOYGRO. En contre-partie, les variables d'entrées concernant le sol n'étaient pas toujours connues avec précision.

La validation globale du rendement (graphique 79) montre que le jeu de données disponibles ne fait pas apparaître de biais systématique entre les valeurs observées et les valeurs simulées (comparaison régression - bissectrice). Toutefois, l'erreur quadratique moyenne de simulation est de 8 qx/ha, ce qui peut sembler élevé dans une première approche. C'est pourquoi, nous avons tenté d'analyser ce résultat en codant les points selon 4 critères : la variété, l'alimentation hydrique, l'année et la source des données (graphiques 80 au verso).

Il apparaît alors deux effets importants, l'effet régime hydrique et l'effet source des données. Ce dernier effet intègre une composante liée à la technicité de l'expérimentateur et une composante liée à la parcelle (sol, précédent cultural qui joue sur la sensibilité aux maladies, ...). Ainsi les points pour lesquels la sur-estimation est importante correspondent au site de Montélimar pour des cultures irriguées. Or la validation du bilan hydrique a montré que le modèle pose quelques problèmes sur ce site à sol battant. Quant à l'effet hydrique, il faut noter que la sous-estimation des cultures conduites en sec concerne essentiellement le site INRA de Toulouse. Cela peut s'expliquer par une mauvaise estimation des variables d'entrées liées au sol, et en particulier de la profondeur obstacle à l'enracinement qui, on l'a vu, joue un rôle important dans le modèle, ou de la non prise en compte de phénomènes qui peuvent réduire les effets de la sécheresse, comme par exemple les remontées capillaires provenant du sol sous-jacent.

Nous pensons donc que les écarts entre observations et simulations sont liés principalement à une mauvaise simulation de la réserve en eau du sol dans certaines conditions (ruissellement, sol superficiel en conditions sèches). Il aurait été intéressant de pouvoir vérifier cette hypothèse en "forçant" le modèle avec des mesures de l'état hydrique du sol (malheureusement non réalisées) et d'évaluer la part de la variance due au facteur sol et celle due aux autres facteurs (GOUDRIAN, com. pers.).



La validation des composantes du rendement réellement simulées, c'est-à-dire nombre de gousses/m² et poids de 1000 grains, met en évidence des biais de simulation qui se compensent. Cet équilibrage ne doit pas nous surprendre puisque les fonctions, en aval, de production de matière sèche et de répartition dans les graines sont correctement simulées et que la validation du rendement, elle, n'est quasiment pas biaisée. Comme la composante nombre de gousses/m² se met en place en premier, c'est elle qui règle le niveau de la seconde composante, le poids de 1000 grains.

La sous-estimation du nombre de gousses/m², que souligne le graphique 81, se trouve augmentée en conditions sèches. Cette constatation nous conduit à l'hypothèse que les répercussions du stress hydrique sur la mise en place des gousses sont peut être trop sévères dans la simulation. En effet, le facteur d'avortement trophique des fleurs cumule les effets du stress hydrique sur la photosynthèse et sur l'indice foliaire. Par ailleurs, le seuil d'avortement des gousses (second stade d'avortement) est fixé à 60% des besoins en photosynthétats, ce qui est peut être élevé, tout au moins en cas de stress hydrique.

Nous devons toutefois rester prudent dans l'analyse des données de validation du rendement et de ses composantes, compte-tenu des sources d'informations multiples. Il existe, en effet, un paramètre que l'on ne maîtrise pas : les pertes à la récolte qui, selon SCOTT et ALDRICH (1970) peuvent varier de 5 à 20% dûes essentiellement à la mécanisation de la moisson. Dans la pratique, il est fréquent que l'une des composantes du rendement soit ajustée au rendement "moissonneuse" et donc intègre les pertes.

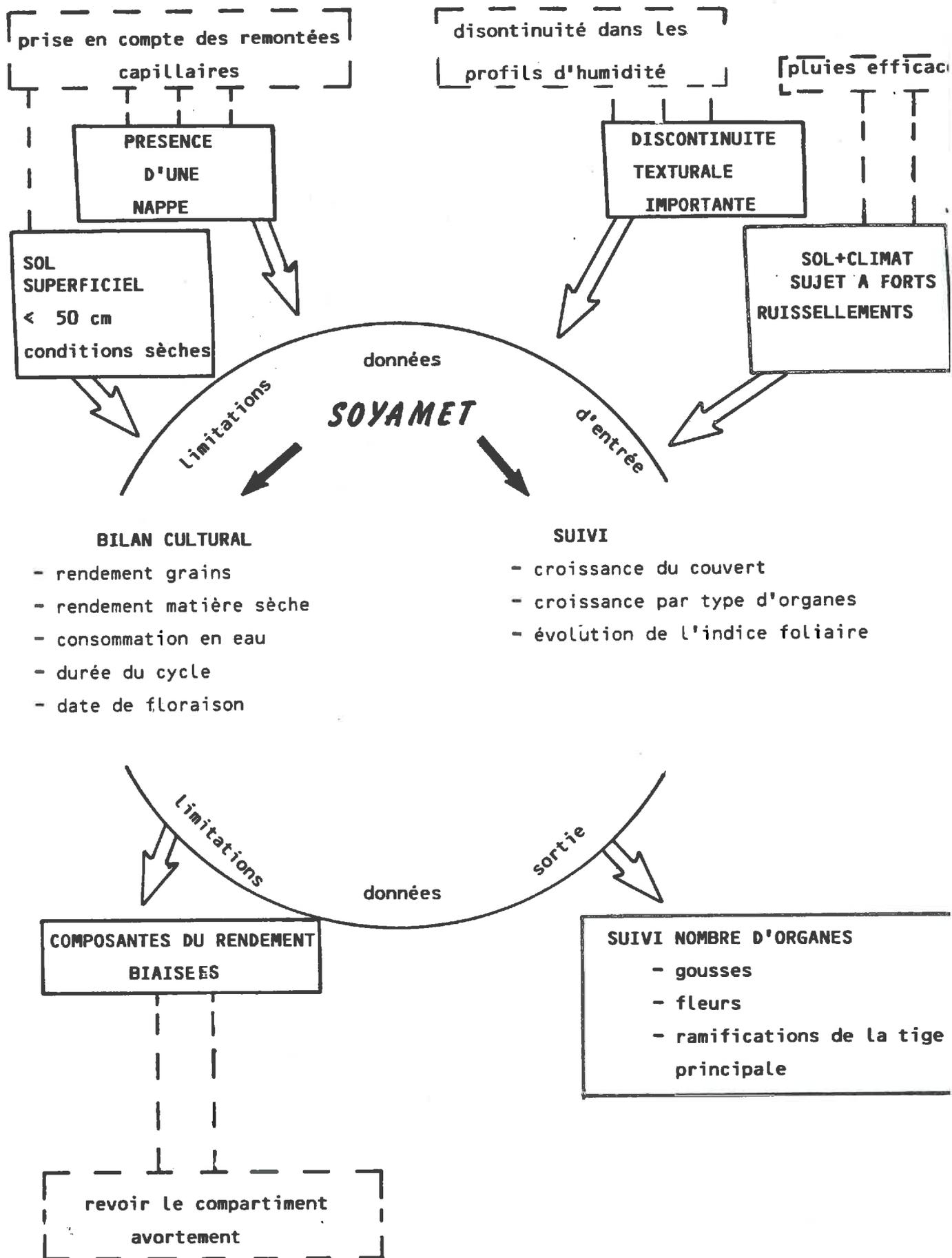


Figure 83 Conclusion sur l'utilisation du modèle

VII CONCLUSION SUR LES LIMITES D'UTILISATION DU MODELE

L'ensemble des résultats de validation et de sensibilité du modèle nous permet d'établir les bornes nécessaires à l'utilisation du modèle SOYAMET, tant au niveau des données d'entrée que des objectifs de sortie visés par l'utilisateur (figure 83).

1. Limitations au niveau des données d'entrée

Elles concernent surtout les données de sol, et en particulier les sols superficiels soumis à des conditions sèches.

En effet, nous avons constaté la grande sensibilité du modèle hydrique vis-à-vis de la profondeur du sol, qui en cas d'absence de pluie (ou d'irrigation), assure l'alimentation hydrique de fin de cycle. Quand cet obstacle à l'enracinement est profond, l'arrêt de croissance racinaire simulé intervient alors que l'essentiel du chevelu est en place. En revanche, si cet obstacle est superficiel, il pénalise le système racinaire, et donc les parties aériennes, en pleine croissance. Dans la réalité, l'hétérogénéité du substrat, au niveau de sa compacité et de sa répartition spatiale, fait que l'obstacle n'est pas aussi absolu que le suppose le modèle. De plus, nous sommes dans un cas de sol superficiel à forte demande évaporative, où l'eau stockée dans le sous-sol réalimente probablement le réservoir par remontées capillaires, phénomène non pris en compte dans le modèle.

Ces phénomènes de remontées capillaires peuvent également jouer un rôle important lorsqu'il existe une nappe à faible profondeur.

Le modèle SOYAMET, contrairement au modèle SOYGRO, sera mis en défaut dans les cas de discontinuité texturale importante, puisqu'il n'accepte qu'un jeu de données d'entrée moyennes sur l'ensemble du profil de sol. Encore une fois, cela tient à la prise en compte de la croissance racinaire qui fait que l'eau de surface et l'eau de profondeur ne jouent pas le même rôle : la première sert au développement foliaire et la seconde à la croissance des organes reproducteurs.

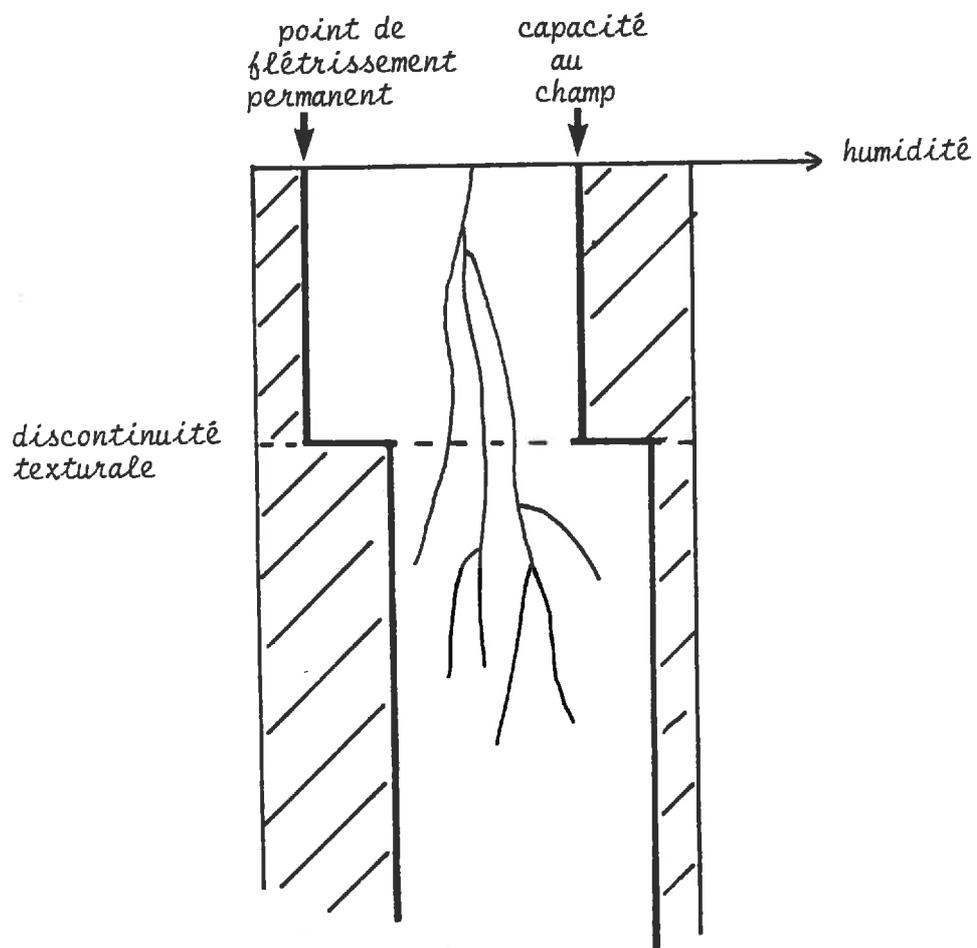


Figure 84
Prise en compte d'une discontinuité texturale

Toutefois, dans le cas d'une discontinuité texturale majeure, on pourrait envisager de modifier les profils d'humidités caractéristiques, jusqu'alors supposés homogènes, au niveau du changement pédologique (figure 84).

Enfin, nous avons constaté que les sites sujets à de forts ruissellements n'étaient pas correctement simulés. Pour remédier à cet inconvénient, il serait nécessaire de modéliser les phénomènes de ruissellement en relation avec l'interception des apports d'eau par la végétation, de façon à évaluer la quantité réelle d'eau qui pénètre le sol. Mais, la prise en compte de ces phénomènes ne semble pas pouvoir se faire de façon simple (STROOSNIJDER, 1982; de JONG, 1988).

2. Limitations au niveau de l'utilisation des données de sorties.

SOYGRO est défini, par ses auteurs, comme un modèle qui donne des informations à l'échelle du couvert végétal. Certes, pour expliquer correctement un niveau d'organisation, il faut s'appuyer sur des expérimentations concernant les niveaux inférieurs tels que la plante, l'organe ou la cellule (de WIT, 1982), c'est pourquoi la description de SOYGRO en première partie mentionne ces niveaux inférieurs. On ne peut, toutefois, pas utiliser SOYGRO pour en étudier l'organisation.

Donc, à l'échelle de la parcelle, le modèle nous propose deux catégories d'information que nous avons jugées fiables d'après les résultats de validation (figure 83) et compte tenu des limitations au niveau des entrées : des informations de synthèse qui constituent un bilan cultural et des données de suivi dans le temps des principaux descripteurs de la culture. Cependant le modèle ne permet pas de restituer des données relatives au nombre d'organes, soit parce que la simulation est biaisée (nombre de gousses et donc composantes du rendement), soit parce que les organes ne sont pas individualisés (ramifications, nombre de feuilles), soit encore parce qu'ils ne sont pas pris en compte (fleurs, nodosités).

En fournissant des informations agronomiques qui permettent d'intégrer la variabilité climatique et pédologique (avec quelques restrictions) du milieu, le modèle SOYAMET répond bien aux besoins de l'agrométéorologie.

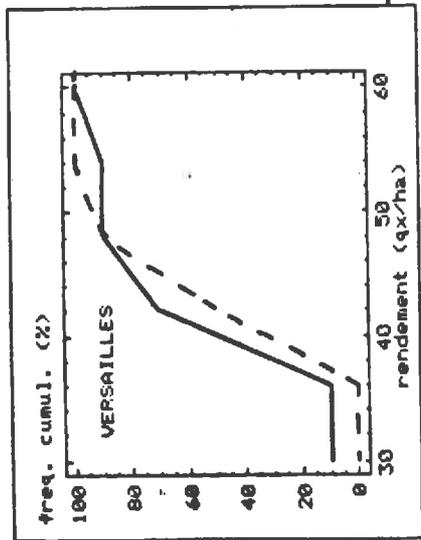
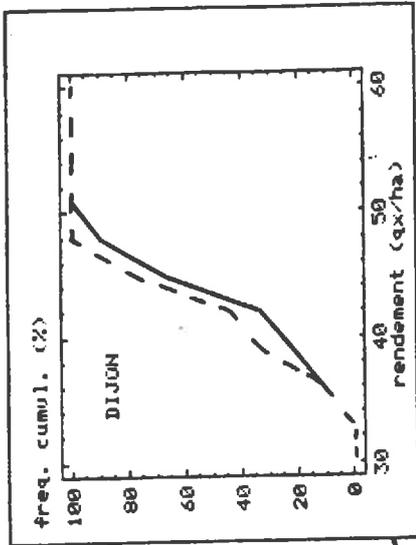
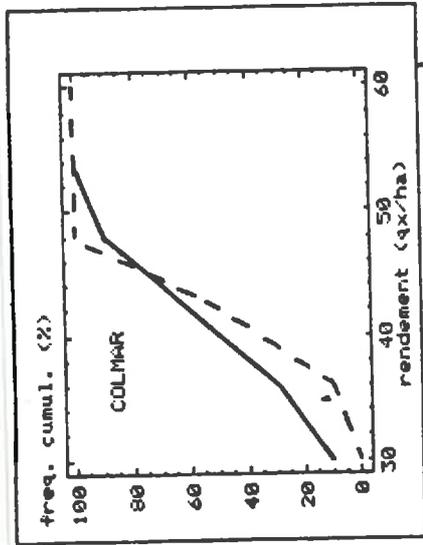
**F CONCLUSION : VERS UNE ETUDE DE
POTENTIALITES AGRICOLES.**

Le rendement, la consommation en eau de la culture ou encore la durée de son cycle sont autant d'éléments qui comptent dans les choix des professionnels de l'agriculture et auxquels nous donne accès le modèle SOYAMET. Nous avons donc choisi de proposer, dans ce chapitre de conclusion, des pistes de travail pour mener une étude de potentialités agricoles au moyen de ce modèle de simulation de culture.

Nous n'aborderons pas les aspects cartographiques liés au zonage des potentialités, qui soulignent la difficulté de croiser des données climatiques et pédologiques dont la distribution spatiale et temporelle diffèrent. Signalons, toutefois que SANTIBANEZ (1983, 1986) et KING et al. (1986) apportent des réponses intéressantes à ce problème.

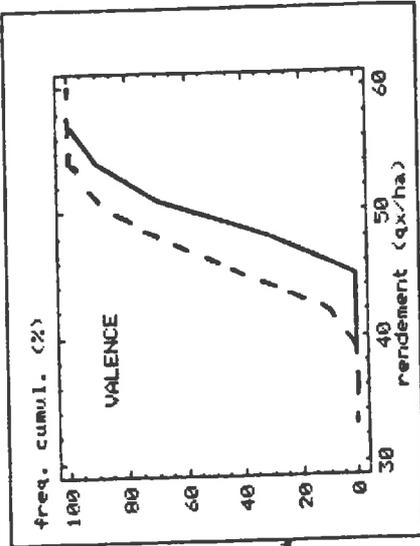
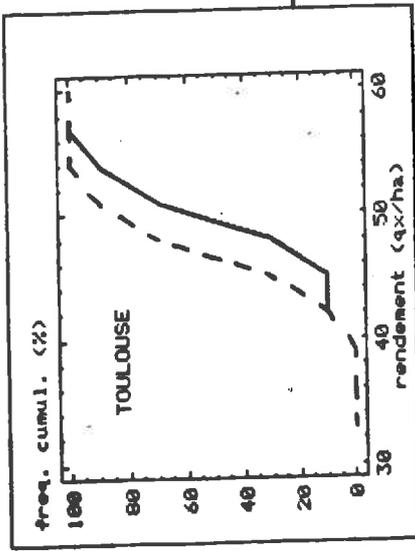
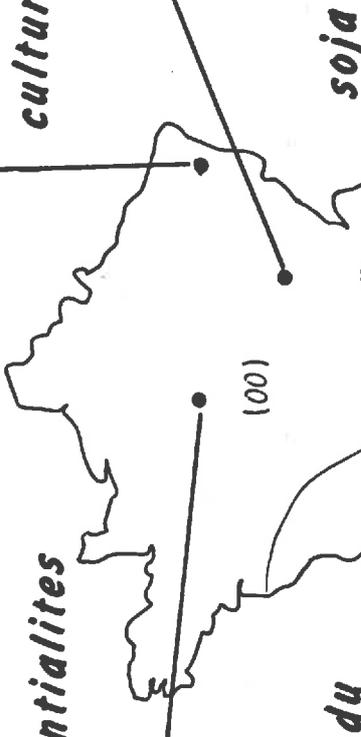
Nous nous attacherons davantage à définir le "contenant" d'un éventuel zonage en suggérant le paramètre à cartographier. Nous plaçant en un site précis, défini par son climat et son sol, nous chercherons à identifier les paramètres agronomiques limitants liés à des choix techniques tels que les dates de semis, la variété ou l'irrigation. Pour toucher du doigt la variabilité spatiale certains des paramètres seront calculés sur 7 sites répartis dans toute la France, reportés sur la carte.

Partant du schéma, proposé en introduction, qui met en évidence les différents niveaux de la notion de potentialités, nous nous intéresserons successivement aux potentialités culturelles, c'est à dire sans contrainte exercée par le milieu, puis à un niveau de potentialités agricoles qui intègre la contrainte hydrique. En réalité, dans le calcul des potentialités culturelles nous prendrons en compte la contrainte thermique qui intervient sur le développement et aussi sur un certain nombre de fonctions physiologiques (voir première partie)



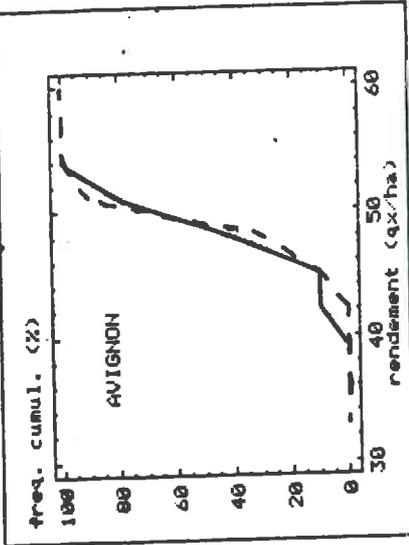
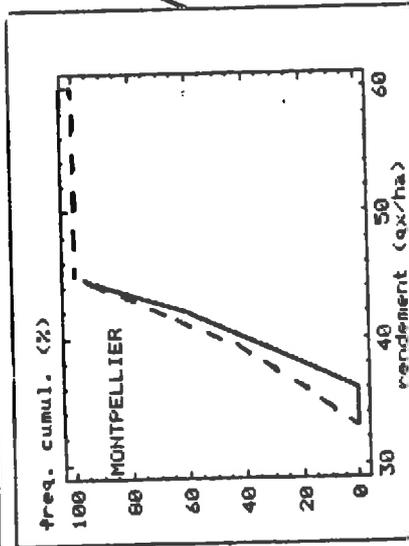
culturales

potentialites



du

soja



----- semis tardif
 1er mai : zone 00
 1er juin : zone I et II

— semis précoce
 1er avril : zone 00
 1er mai : zone I et II
 var 00 : indéfinie
 var I : weber
 var II : kingsoy

I . LES POTENTIALITES CULTURALES

Il s'agit d'un optimum, rarement atteint, mais qui permet de borner la production et de réaliser des calculs économiques extrêmes tels que l'évaluation des coûts de production maxima ou les possibilités d'extensions maximales de la culture du soja compte-tenu des pressions commerciales.

Pour réaliser cet optimum, l'agriculteur devra s'affranchir des contraintes et en particulier de la contrainte hydrique en apportant une quantité d'eau suffisante. Par ailleurs, un choix judicieux de variété et de date de semis peuvent augmenter les rendements de façon appréciable. Mais le paramètre "rendement" n'est pas toujours le plus décisif dans le choix de l'agriculteur, surtout pour une culture de printemps. Ainsi, par exemple, la durée du cycle est importante pour planifier une rotation culturale, ou lorsque un printemps trop pluvieux impose de retarder les semis.

1 . Le rendement

Les études fréquentielles reportées autour de la carte 85 et résumées sur la figure 86 (verso) par les valeurs médianes, montrent qu'au sud de Dijon, on a une probabilité de 100 % d'obtenir un rendement supérieur à 30 quintaux. En revanche, plus au nord la probabilité d'échec de la culture est de l'ordre de 10 % pour des semis précoces, et donc pour ces régions un semis tardif semble préférable. Ailleurs, les gains de rendement liés à la précocité du semis ne sont appréciables qu'à Valence et Toulouse. A Montpellier, on constate des niveaux de rendement faibles comparés aux autres sites méditerranéens, ce qui provient d'un raccourcissement du cycle reproducteur lié aux températures élevées.

L'introduction des variétés à croissance déterminée permet des gains de rendement en semis précoce (graphique 87 au verso).

On constate sur le graphique 88 (verso) que la production de biomasse ne suit pas toujours le rendement en grains. Ainsi, en semis précoce les deux sites de Toulouse et de Montpellier ont des niveaux de biomasse équivalents alors qu'ils se distinguent au niveau du rendement.

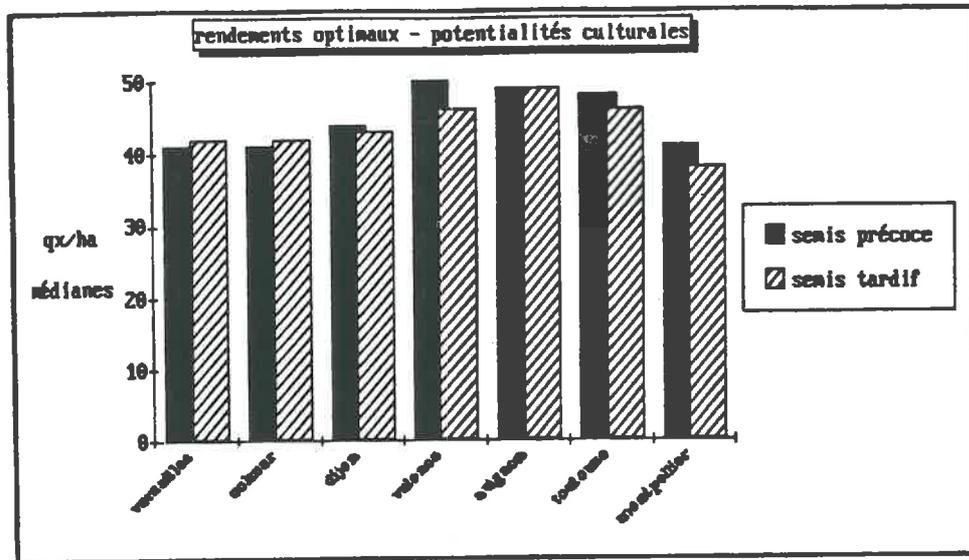


Figure 86

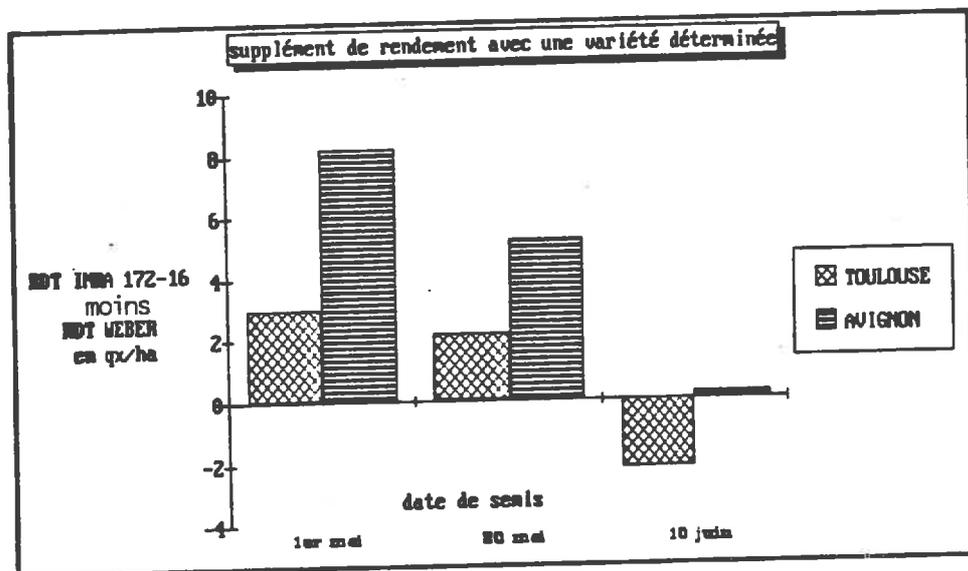


Figure 87

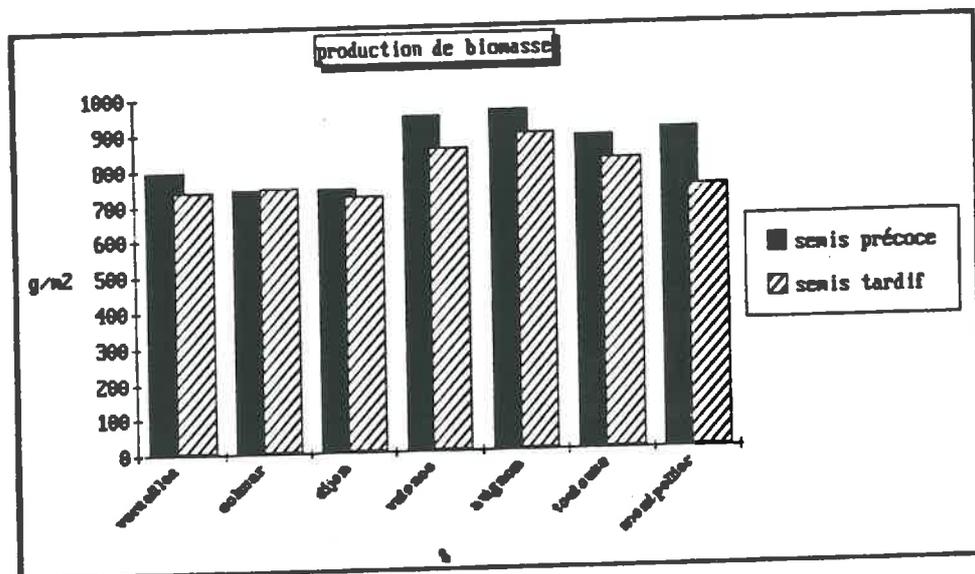


Figure 88

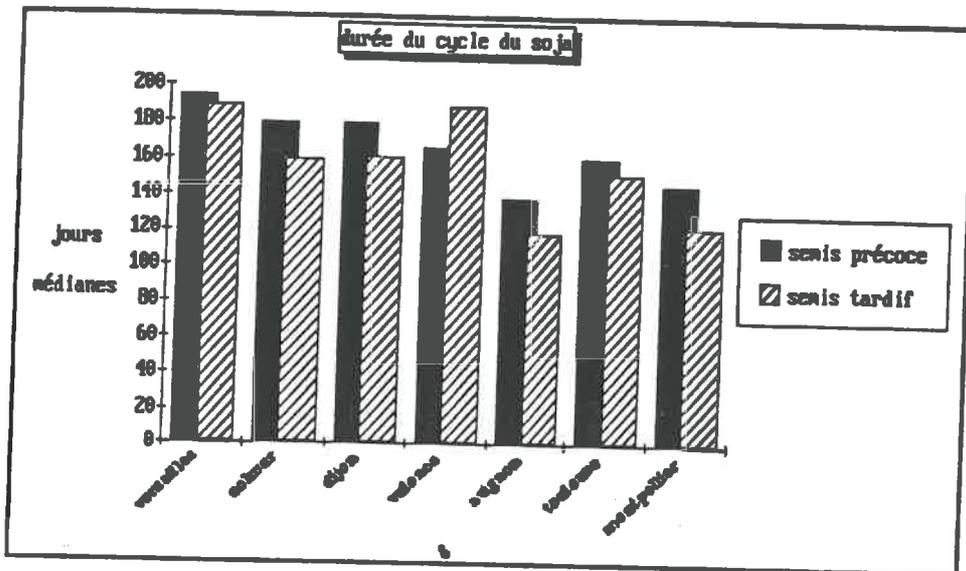


Figure 89

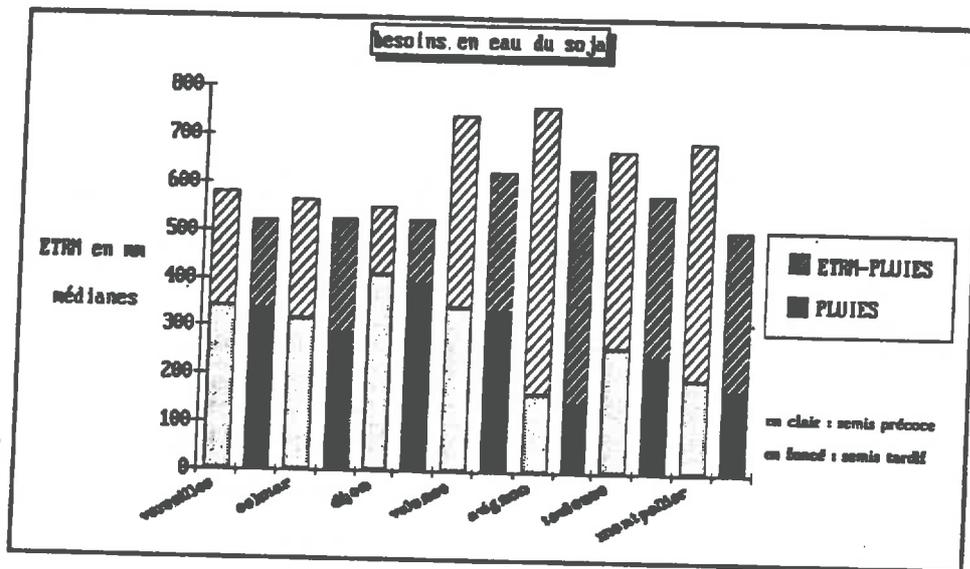


Figure 90

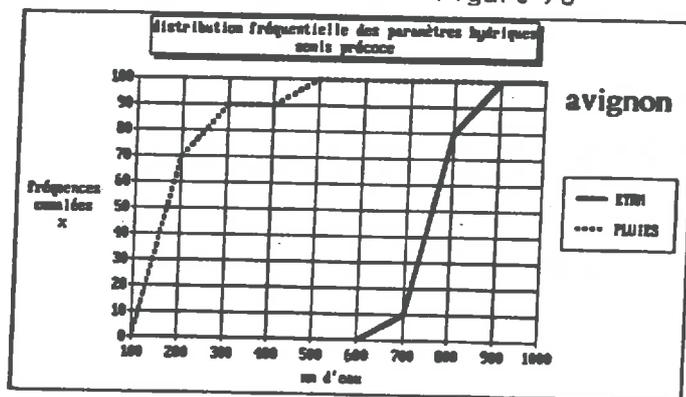
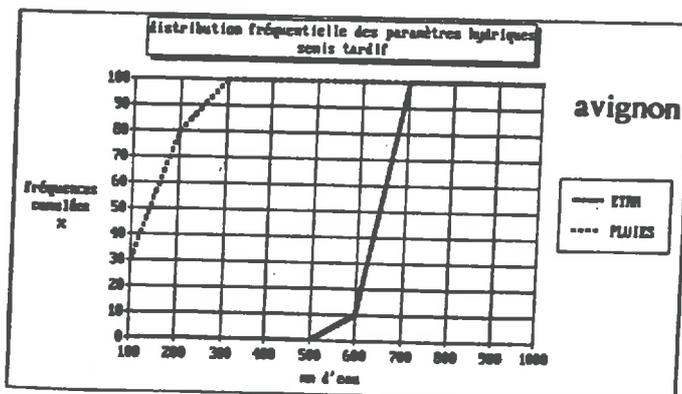


Figure 91



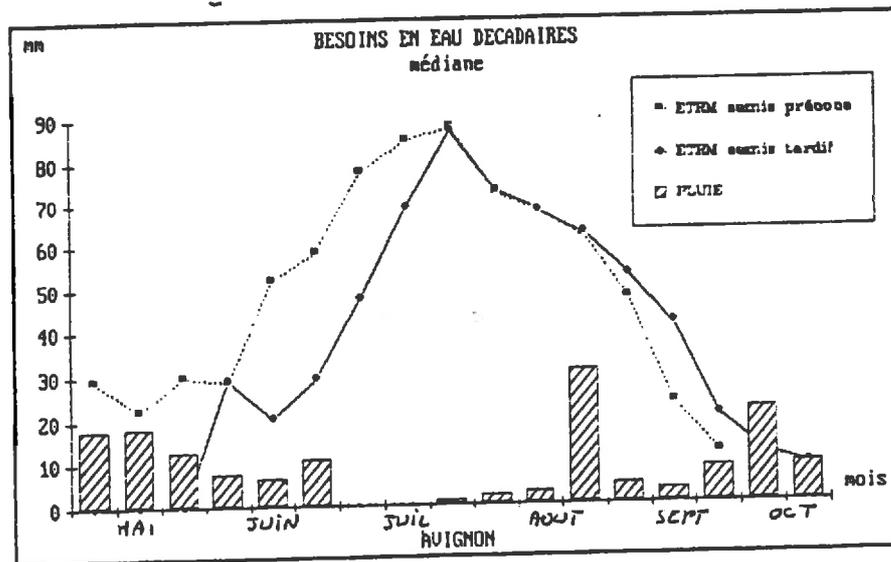


Figure 92a

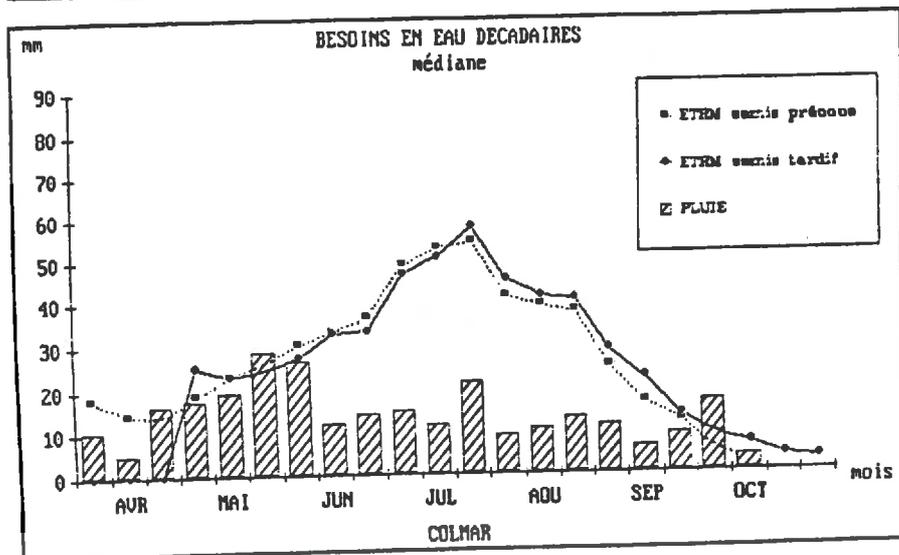


Figure 92b

2 . Durée du cycle

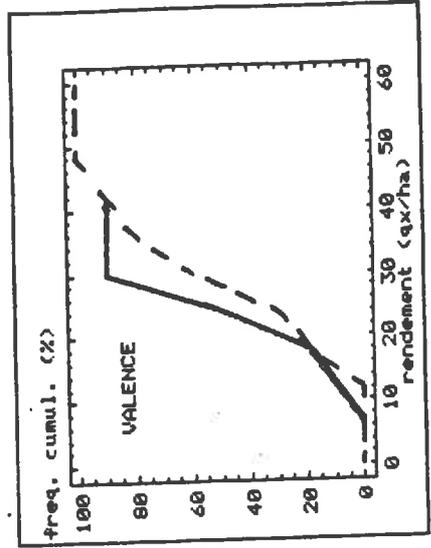
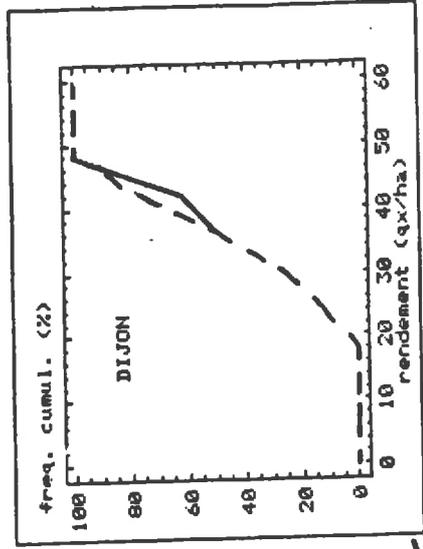
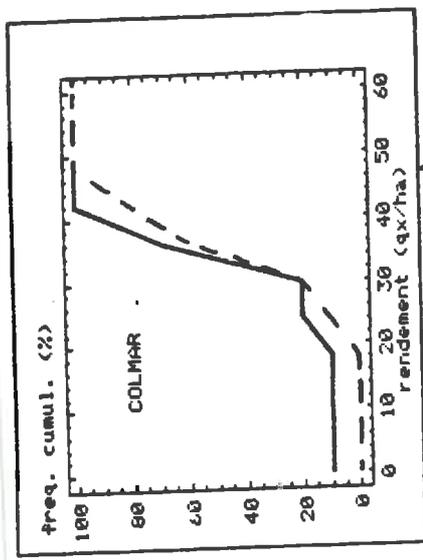
La variation de la durée du cycle cultural (figure 89) est suffisamment importante pour attirer l'attention de l'agriculteur. Du nord au sud, elle atteint de 120 à 190 jours. Les durées de cycle simulées au nord peuvent paraître longues par rapport à l'expérience agricole de la culture du soja dans ces régions (BLANCHET, com. pers.). Cela tient au fait que la date de récolte est estimée en fonction des températures uniquement, censées simulées le dessèchement. Or en pratique la décision de récolter peut être liée à d'autres critères : risques phytosanitaires, risques de verse, risques de réhumectation des grains avec les pluies automnales...

En général le semis tardif admet un cycle plus court de sorte que les récoltes peuvent intervenir au même moment pour les 2 types de semis. Cela ne se vérifie pas à Valence où les dates de semis proposées (1er mai en précoce et 1er juin en tardif) sont peut-être mal adaptées à ce site. Les cycles courts des sites méditerranéens peuvent permettre des cultures de soja en dérobé.

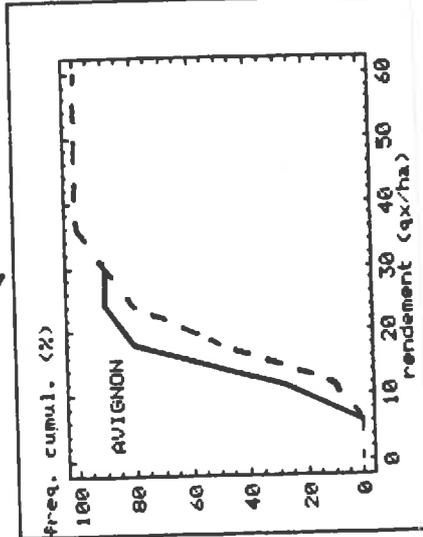
3 . Consommation en eau

C'est avec le paramètre consommation en eau (figures 90 et 91) qu'apparaît l'intérêt de décaler les semis, surtout en zone méditerranéenne, puisque l'on peut gagner jusqu'à 180 mm d'eau d'irrigation (Avignon, Montpellier). Toutefois, les distributions fréquentielles montrent qu'en semis tardif les risques de ne pas obtenir au moins 100 mm de pluie au cours du cycle ne sont pas négligeables (30 %).

Par ailleurs, il faut tenir compte de la répartition temporelle des besoins et des apports d'eau pour avoir une idée exacte des irrigations nécessaires (figures 92 a et b).



--- semis tardif
 1er mai : zone 00
 1er juin : zone I et II

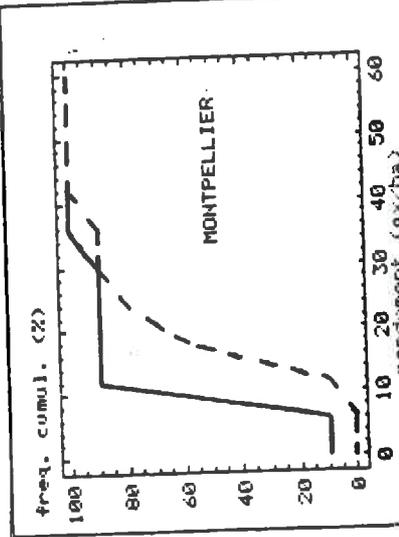
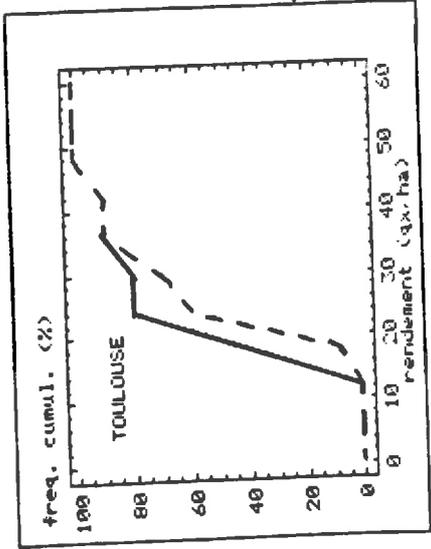
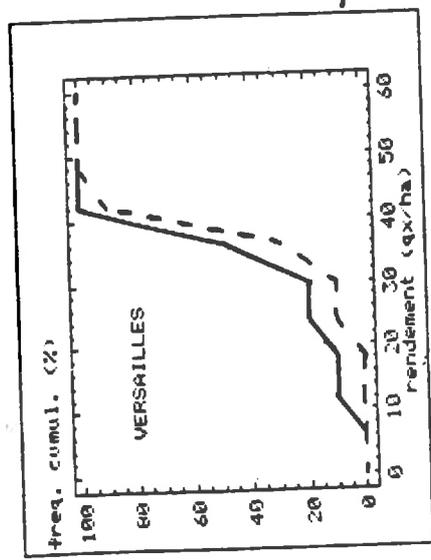


agricoles

en sec

Potentialités

du soja



— semis précoce
 1er avril : zone 00
 1er mai : zone I et II
 var 00 : indéfinie
 var I : WEBER
 var II : KINGSOY

II . POTENTIALITES AGRICOLES AVEC CONTRAINTE HYDRIQUE

La prise en compte de la contrainte hydrique dans le modèle met en oeuvre le modèle de bilan hydrique qui doit être initialisé par la réserve en eau du sol au semis. Cela tient au fait que SOYAMET est un modèle discontinu qui ne simule que les phénomènes intervenant du semis à la récolte, or l'état du réservoir sol au semis dépend des pluies hivernales et printanières qui précèdent. Aussi, dans le cadre d'une étude de potentialités, serait-il intéressant de pouvoir calculer la réserve initiale par le biais d'un bilan hydrique pré-cultural. C'est sans doute une amélioration à apporter au modèle, mais à ce stade de notre travail, nous avons supposé que la réserve était remplie au semis.

Nous nous intéresserons tout d'abord aux rendements obtenus en sec, puis nous analyserons les moyens de réduire cette contrainte hydrique.

1. Potentialités agricoles en sec

Nous nous sommes placés dans le cas d'un sol de 1.5m de profondeur et de 1.3mm de ruu et nous avons réalisé l'analyse fréquentielle sur les 7 sites, pour les 2 dates de semis. Il ressort (figures 93 à 95) que l'absence d'irrigation est un handicap majeur à la culture du soja en zone méditerranéenne, puisque en sec on ne peut espérer plus de 20 qx/ha à Toulouse, Avignon et Montpellier. En revanche, dans la zone nord les suppléments de rendement dus à l'irrigation ne dépassent pas 8 qx/ha une année sur deux, ce qui économiquement ne justifie pas forcément les investissements nécessaires à la mise en oeuvre de cette technique.

Si l'agriculteur est contraint de conduire sa culture en sec, il peut toutefois jouer sur la date de semis puisque les graphiques montrent qu'un semis tardif permet des gains de rendement appréciables dans le sud.

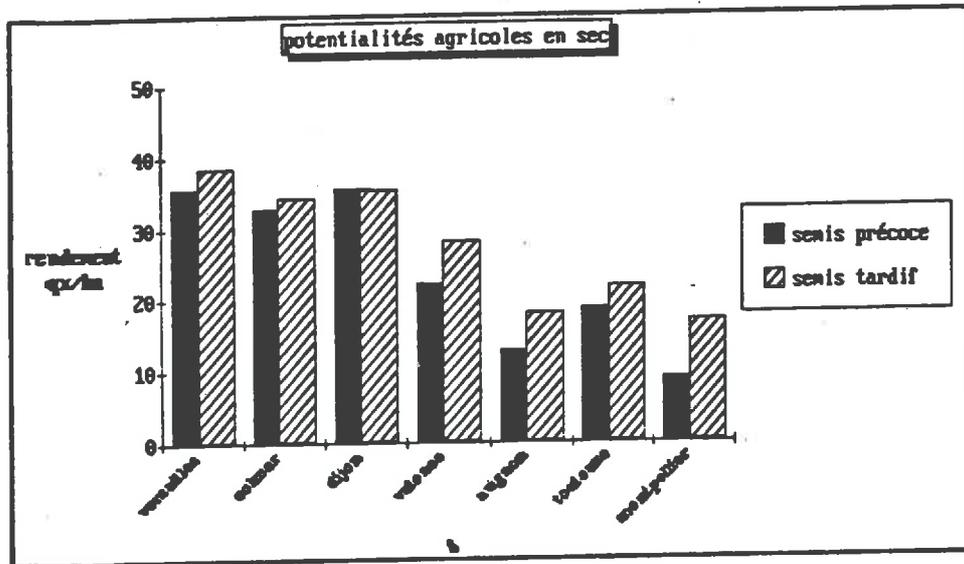


Figure 94

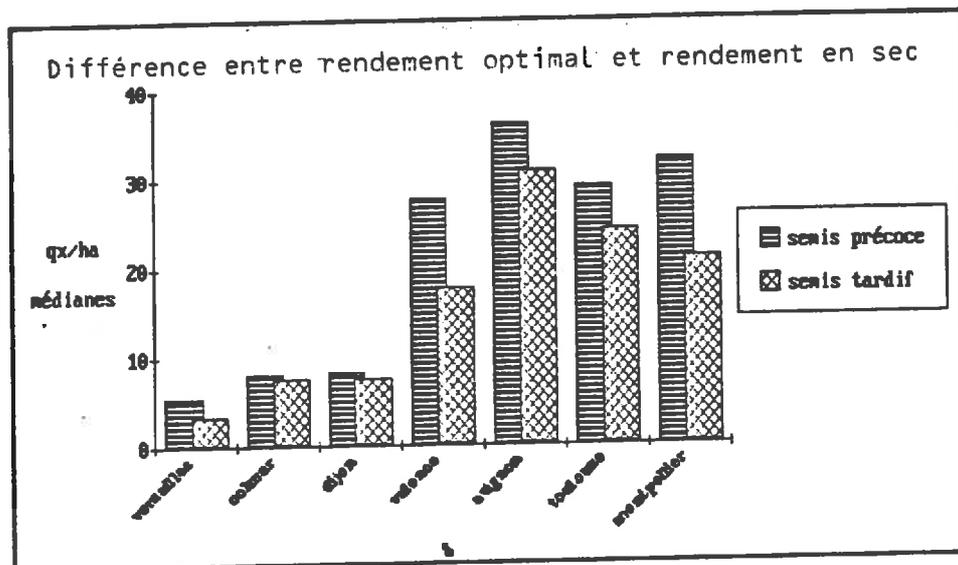


Figure 95

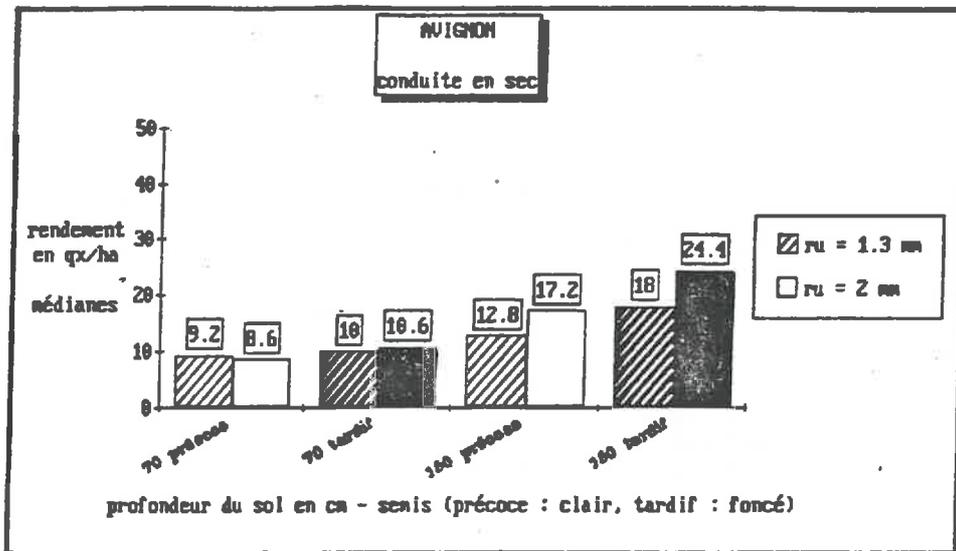


Figure 96a

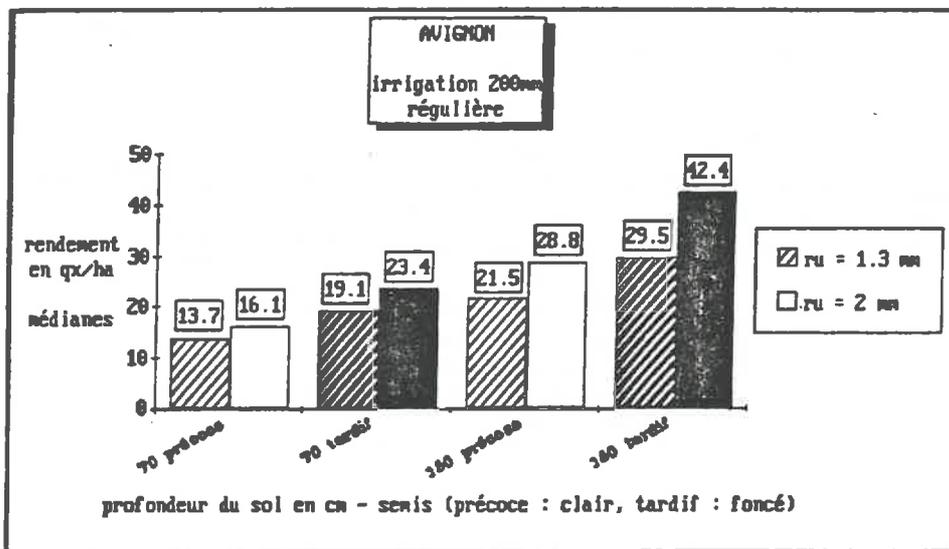


Figure 96b

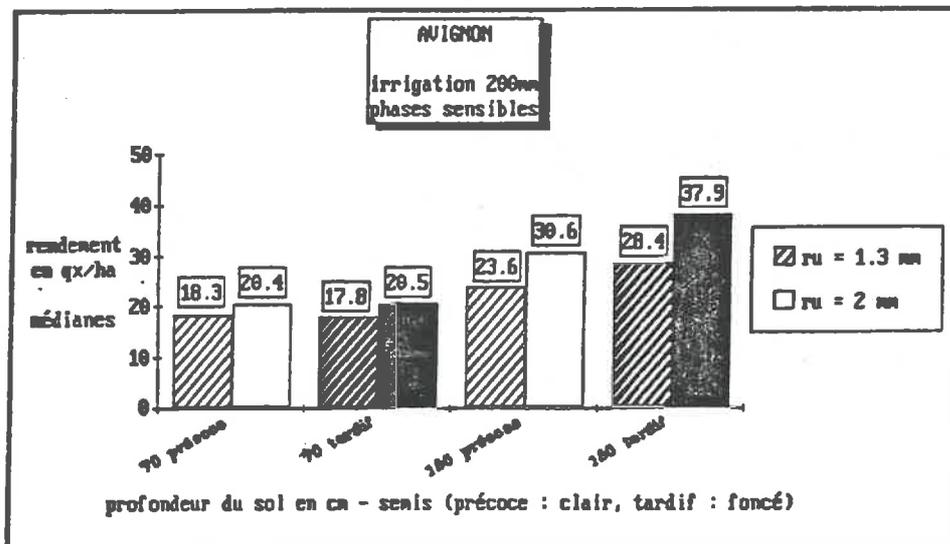


Figure 96c

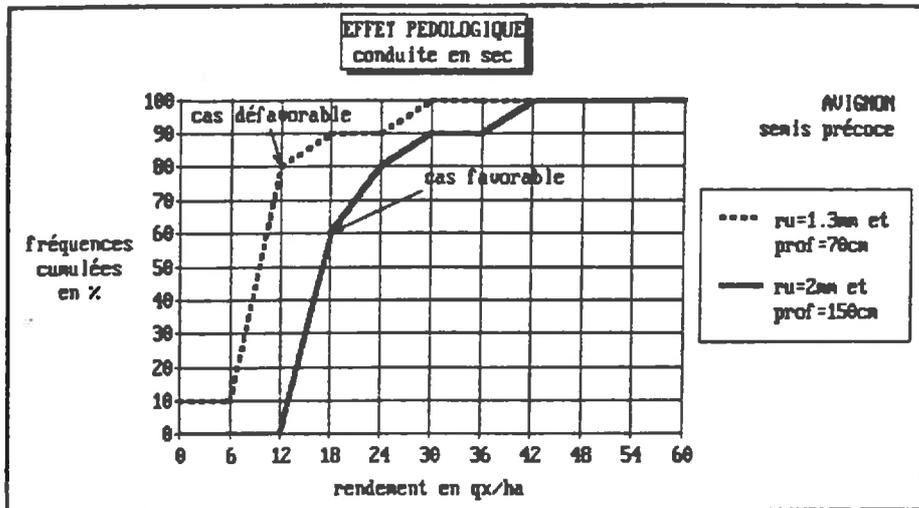


Figure 97a

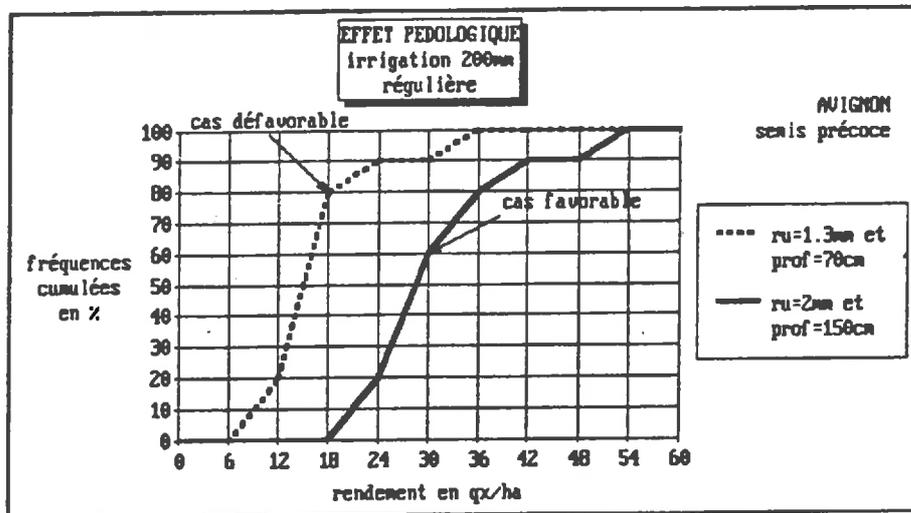


Figure 97b

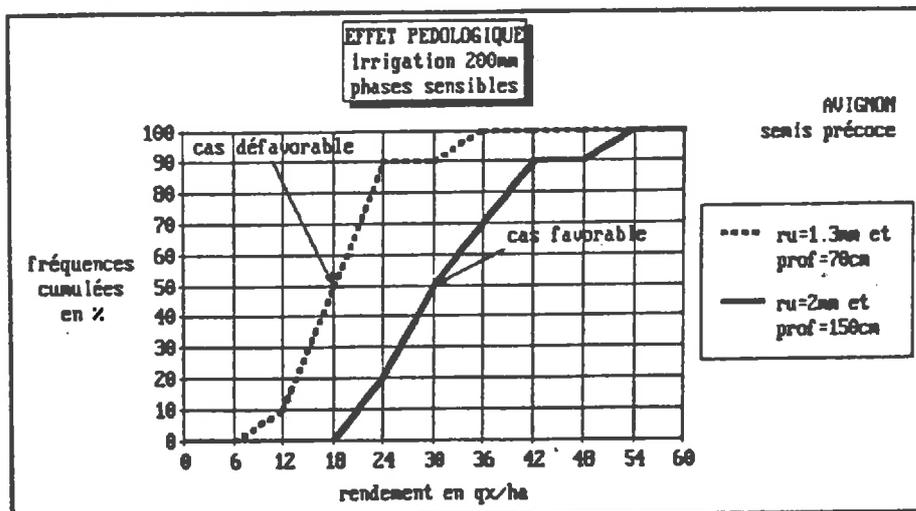


Figure 97c

2 . Réduction de la contrainte hydrique

La réduction de la contrainte hydrique peut provenir d'un effet pédologique qui améliore les capacités de stockage de l'eau, ou de l'irrigation, les deux effets n'étant pas indépendants.

A titre d'exemple, nous proposons des résultats sur le site d'Avignon

. effet pédologique

Nous avons envisagé 4 types de sol, caractérisés par leur profondeur (70 ou 150 cm) et leur ruu (1.3 ou 2mm/cm), et nous nous sommes donné une irrigation maximale de 200mm, permettant de définir 3 régimes hydriques (en sec et avec une irrigation de 200 mm répartie régulièrement (1) sur le cycle ou focalisée sur les phases sensibles (2)).

Il ressort des graphiques 96 (verso) que les sols peu profonds sont fortement pénalisés en sec, quelle que soit leur réserve utile et indépendamment de la date de semis. Ainsi, la profondeur du sol apparaît comme un facteur limitant de premier ordre en conditions sèches. En revanche, dès que l'on dispose d'un complément hydrique par irrigation, on peut espérer atteindre 15 à 20 qx/ha en jouant sur la date de semis. Et cela permet, en outre, de valoriser des différences de ruu. Il est intéressant de noter la différence de comportement de ces sols superficiels vis-à-vis de la répartition des irrigations conjuguée à la date de semis : si l'on est lié à une irrigation régulière (irrigation à la raie - tour d'eau), il vaut mieux semer tard, alors que si l'on cherche à minimiser le nombre d'apports la date de semis importe peu.

En ce qui concerne les sols profonds, on constate une influence importante de la date de semis dont le retard permet des gains de rendement appréciables (de 5 à 14 qx/ha) quelles que soient les conditions de régime hydrique et de r.u..

Les études fréquentielles présentées sur les graphiques 97 (verso) soulignent que l'effet pédologique se manifestera davantage avec une irrigation d'appoint. En conditions sèches, le cas pédologique favorable permet essentiellement d'annuler les risques d'échec complet de la culture (10% pour le cas défavorable).

Reste que l'on peut se demander, dans ces situations pédologiques particulièrement défavorables, s'il est économiquement intéressant d'engager des frais d'irrigation si les apports d'eau ne peuvent excéder 200mm.

On note en particulier que les variations interannuelles demeurent (graphique 98).

(1) 10 irrigations de 20 mm chacune tous les 10 jours à partir du semis.

(2) 5 irrigations de 40 mm chacune à partir de la floraison.

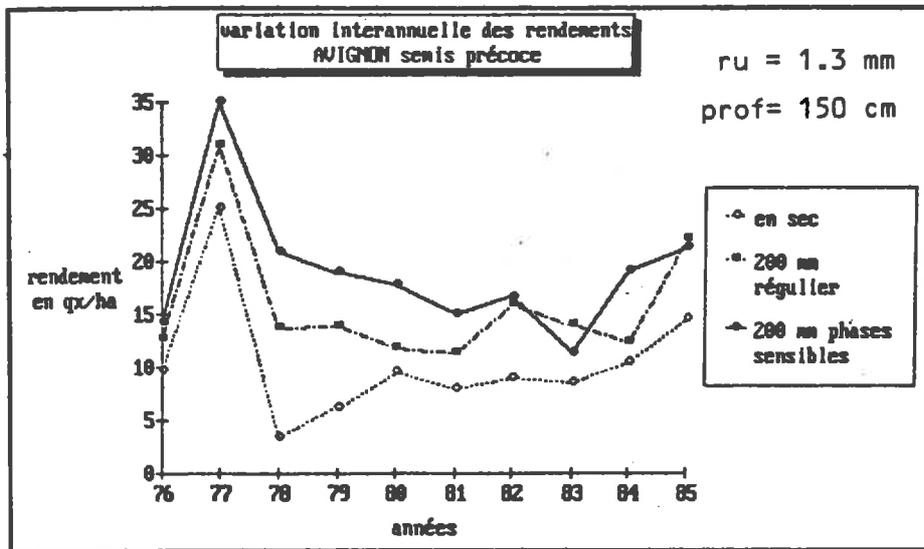


Figure 98

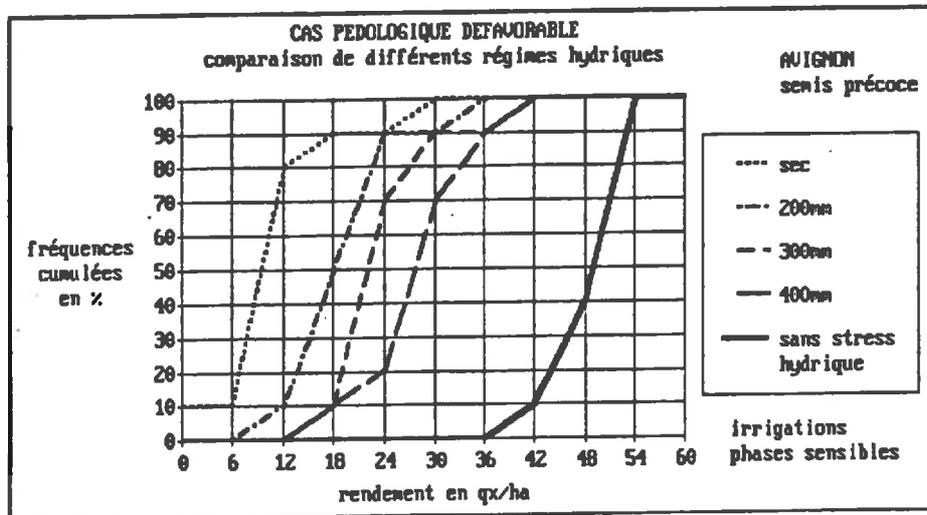


Figure 99

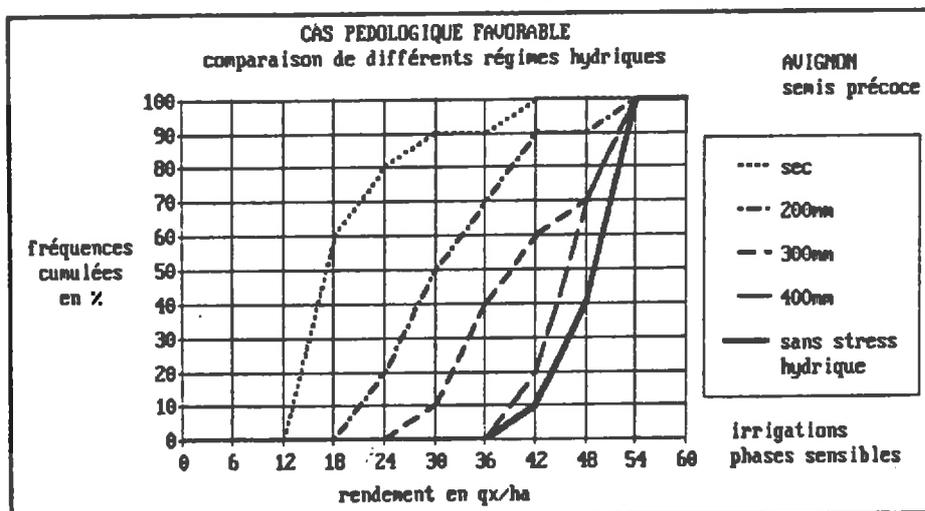


Figure 100

. effet de l'irrigation

Nous nous sommes placés dans les deux cas pédologiques extrêmes et nous avons cherché à définir la quantité d'irrigation minimale qui permette d'approcher le rendement "cultural" calculé précédemment, cette irrigation étant focalisée sur les phases sensibles.

Dans le cas d'un sol superficiel (figure 99) à faible réserve, l'irrigation améliore nettement le niveau des rendements mais ne suffit pas à atteindre le potentiel cultural. En fait, le sol ne joue quasiment pas son rôle de réservoir et il serait nécessaire, pour atteindre ce potentiel d'apporter une quantité d'eau équivalente aux besoins diminués des pluies (voir I), soit environ 600mm.

En revanche, pour les sols profonds à forte réserve (figure 100), 400mm d'irrigation permettent d'atteindre le potentiel cultural. Dans 30% des cas, 300mm peuvent suffirent.



III. CONCLUSION

Le modèle de simulation de culture, que nous avons mis au point, permet d'accéder à une définition quantitative des potentialités mais on montre en même temps les multiples facettes de cette notion que l'on ne peut détacher des choix techniques. Il est apparu que l'agriculteur pouvait optimiser ces choix. Ainsi pour la région d'Avignon on peut dresser un tableau, très approximatif, des gains de rendement possibles en fonction du facteur sur lequel l'agriculteur peut intervenir. Ces facteurs sont classés dans un ordre exprimant leur "facilité de modification".

date de semis.....	5-10 qx/ha
variété.....	5-10 qx/ha
sol.....	[0-5 qx/ha en sec
	2-20 qx/ha en irrigué
irrigation.....	10-30qx/ha

Les simulations révèlent que pour des sols superficiels, une amélioration de la capacité de stockage (ruu) a peu d'effet sur le rendement si elle ne s'accompagne pas d'une abondante irrigation en fin de cycle. La profondeur du sol apparaît, à travers le modèle, comme l'un des principaux facteurs limitant de la culture du soja.

BILAN DU TRAVAIL - PERSPECTIVES

La compréhension du fonctionnement du modèle SOYGRO, exposé en première partie, nous a permis de bien cerner la démarche du modélisateur et de mettre en évidence les limites de l'outil. En effet, pour respecter l'échelle de travail choisie, qui est celle du couvert végétal, ainsi que les objectifs agronomiques de la simulation, les diverses fonctions physiologiques de la plante ne sont décrites que jusqu'à un certain niveau de détail. Certaines fonctions sont même volontairement oubliées car jugées comme non limitantes vis à vis de la production. Le travail que nous avons réalisé constitue un canevas d'analyse utilisable pour comprendre, adapter, voire élaborer d'autres modèles de simulation de culture.

L'adaptation du modèle SOYGRO aux variétés de soja cultivées dans nos régions a pu être réalisée, en grande partie, grâce à des jeux de données agronomiques préexistants. Les méthodes d'optimisation apparaissent, à ce niveau, fort intéressantes, dès lors que l'on dispose d'un nombre d'observations suffisant.

Partant de l'analyse du compartiment hydrique des modèles de simulation de culture, et en particulier de celui de RITCHIE, nous avons élaboré un modèle de bilan hydrique adapté à des besoins agrométéorologiques et au contexte pédoclimatique français. Ce modèle est destiné à être couplé avec un modèle de croissance puisque la plupart de ses fonctions utilisent l'indice foliaire comme indicateur végétal. En revanche, l'introduction d'une fonction de densité racinaire empirique permet de s'affranchir de la description réelle de l'évolution de la densité de longueur racinaire (via le schéma de répartition des assimilats du modèle de croissance). Cela permet d'intégrer ce modèle hydrique dans des modèles de production plus simples que SOYGRO, qui ne comportent pas forcément de schéma de répartition. Nous nous sommes attachés à évaluer le rôle joué par le sol nu à partir d'une base théorique de description des transferts. Ainsi, le modèle proposé permet d'accéder à l'épaisseur de sol sec, ou mulch, très importante au début de la vie de la jeune plantule. Ce travail apparaît donc comme une base possible pour une étude des problèmes hydriques des cultures en milieu sec. Cependant, on peut envisager d'apporter des améliorations à ce modèle hydrique telles que la prise en compte des phénomènes de ruissellement et de remontées capillaires ou encore l'introduction d'une discontinuité texturale dans le profil de sol.

Malgré quelques limitations, le travail de validation a montré que le comportement du modèle semblait satisfaisant dans le cadre d'une utilisation agrométéorologique. Toutefois, le compartiment de croissance n'a pu être testé dans des conditions très sèches.

Les quelques éléments prospectifs donnés en conclusion démontrent l'intérêt de ce nouvel outil, que constitue le modèle de simulation de culture pour étudier le thème des potentialités agricoles. Dans cet objectif, l'introduction d'un bilan hydrique pré-cultural est une amélioration à envisager.

Cependant l'échelle de travail ne nécessite pas toujours l'utilisation d'un modèle aussi lourd que celui que nous avons étudié. En revanche, il peut servir à générer des relations simplifiées plus maniables à l'échelle locale telles que :

- . rendement en fonction de la consommation en eau
- . efficacité de la conversion des assimilats en matière sèche par organe.

Tout comme le modèle complet, ces relations simplifiées peuvent également servir dans l'aide à la décision, ou la prévision des rendements en association avec la télédétection.

Nous pensons également que ces modèles ouvrent de réelles perspectives pour l'aide au pilotage et le suivi des cultures (aide à court terme). Cependant, notre expérience en matière de simulation de culture nous semble encore insuffisante à l'heure actuelle pour pouvoir mener ce genre d'étude. En effet, un suivi de la culture doit reposer sur des variables intermédiaires à la fois fiables au niveau du modèle et facilement mesurables ou observables sur la culture suivie. Parmi ces variables, les composantes du rendement sont sans doute les mieux adaptées, car elles correspondent à des pratiques agronomiques courantes. Or nous avons vu que leur simulation posait quelques problèmes. Par ailleurs le pilotage d'une culture est lié à un certain niveau d'intensification et donc à un objectif de rendement, que le modèle doit prendre en compte. Ainsi il est nécessaire d'introduire un aspect prédictif dans la simulation, qui pour être opérationnel, passe par l'utilisation de variables d'entrées sous forme probabiliste (variables stochastiques) - c'est surtout le cas des variables climatiques. Et nous sommes encore peu habitués à ce genre d'approche.

Donc, même s'il est prématuré de parler de pilotage des cultures par les modèles, des pistes de travail se dégagent qui, on peut l'espérer, à terme, nous permettront d'atteindre cet objectif.

FIN

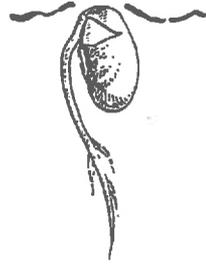
ANNEXES

- annexe 1 : description des stades repères du soja
- annexe 2 : jeu de données phénologiques et rendement
- annexe 3 : ajustement du seuil photopériodique
- annexe 4 : calcul du découpage du cycle reproducteur
- annexe 5 : ajustement logistique de la croissance des gousses
- annexe 6 : analyse détaillée du modèle d'évaporation du sol nu en phase de réduction (PERRIER, 1973, 1982)
- annexe 7 : élaboration d'une fonction de densité racinaire
- annexe 8 : analyse de variance de la biomasse et du LAI par rapport aux données d'entrée du modèle de bilan hydrique
- annexe 9 : analyse de la formule empirique donnant l'évaporation à l'équilibre selon Ritchie
- annexe 10 : listes des abréviations

Stades repères du soja

Variétés de type indéterminé

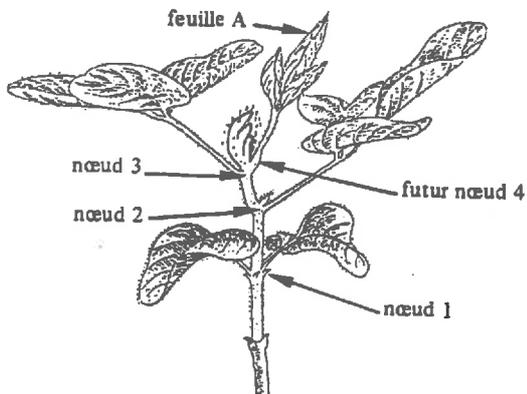
Stade V.E. : Emergence des cotylédons.



Stade V1 : Premier nœud. Développement complet des feuilles unifoliées.

Stade V2 : Deuxième nœud.

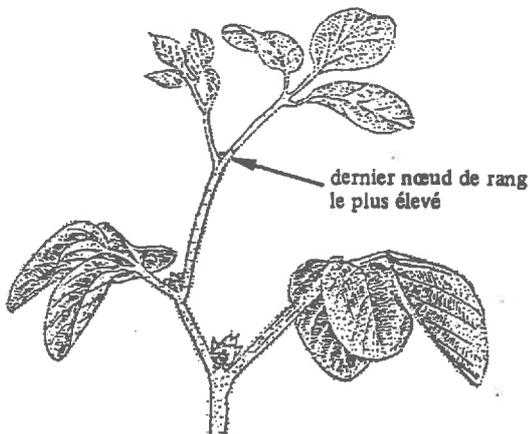
Principe de numérotation des nœuds



Stade V3 : Le nœud 4 sera pris en compte lorsque les bords du limbe de la feuille A ne se toucheront plus. Seuls les nœuds de la tige principale comptent.

Stade Vn : n^{ième} nœud.

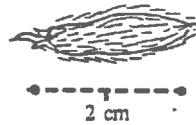
Stade R1 : Début floraison. Une fleur est ouverte sur la tige principale à n'importe quel nœud.



Stade R2 : Pleine floraison. Fleur ouverte à l'un des 2 nœuds de rang le plus élevé.

Stade R3 : Premières gousses.

Une gousse a 5 mm de long sur l'un des 4 nœuds de rang le plus élevé de la tige principale.



Stade R4 : Gousses.

Une gousse de 2 cm de long apparaît à l'un des 4 nœuds de rang le plus élevé de la tige principale.



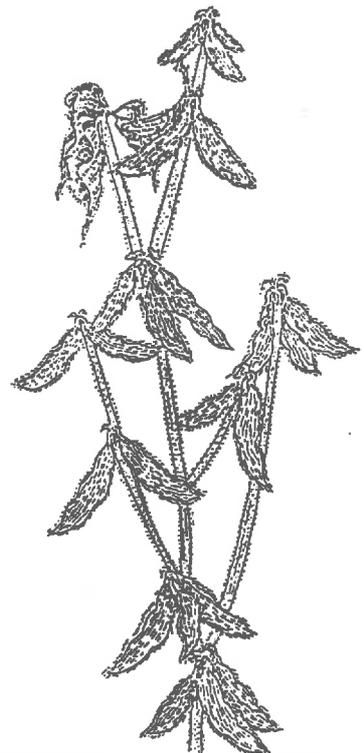
Stade R5 : la graine mesure 3 mm dans l'une des gousses de l'un des 4 nœuds de rang le plus élevé de la tige principale.



Stade R6 : grossissement des graines. Gousse contenant une graine verte qui remplit entièrement la cavité sur l'un des 4 nœuds de rang le plus élevé de la tige principale.

Stade R7 : Une gousse contenant au moins une graine a atteint sa couleur de maturité (marron).

Stade R8 : maturité. 90 % des gousses ont atteint leur stade de maturité (couleur marron).



RIETE	AN	LIEU	SEMIS	LEVEE	R1	R3	R7	R8	DENSITE P1/m ²	ECARTE- MENT cm	RDT Q/Ha	SOURCE	DIVERS
NGSOY	82	Mont.	28.04	15.05	27.06	12.07		1.10			29.67	CETIOM	
BER	82	Mont.	28.04	15.05	24.06	9.07		25.09			24.17	CETIOM	
NGSOY	83	Mont.	6.05	24.05	4.07	18.07		11.10			25.80	CETIOM	
BER	83	Mont.	6.05	24.05	3.07	16.07		9.10			21.25	CETIOM	
NGSOY	84	Mont.	25.04	17.05	11.07	1.08		24.09			26.74	CETIOM	
BER	84	Mont.	25.04	17.05	2.07	25.07		22.09			21.99	CETIOM	
NGSOY	85	Mont.	30.04	17.05	11.07	30.07		27.09			23.35	CETIOM	
BER	85	Mont.	30.04	17.05	4.07	25.07		19.09			24.54	CETIOM	
NGSOY	85	Auz.	19.04		6.07			15.10	45	50	41.20	BLANCHET EUROSOYA	ETM
BER	85	Auz.	19.04		2.07	23.07	15.09		45	50		BLANCHET EUROSOYA	ETM
BER	87	Mont.	26.05	5.06	20.07		21.09	1.10				CETIOM	
-16	87	Mont.	22.04	8.05	29.06		19.09	1.10				CETIOM	
-16	87	Mont.	26.05	5.06	20.07		01.10	9.10				CETIOM	
BER	87	Nimes	12.06	17.06	21.07				55	40		CNABRL	
NGSOY	85	Mont.	24.04		12.07						29.15	CETIOM	
BER	85	Mont.	24.04		5.07						30.05	CETIOM	
NGSOY	86	Mont.	15.05		15.07	30.07					30.26	CETIOM	
BER	86	Mont.	15.05		3.07	15.07	17.09				36.54	CETIOM	
-16	86	Mont.			7.07	21.07	17.09				31.29	CETIOM	
-16	85	Auz.	19.04						45	50	42.70	BLANCHET EUROSOYA	ETM
NGSOY	86	Mont.	26.05	7.06	18.07	4.08		3.10	41	35	28.88	CETIOM	
NGSOY	86	Mont.	29.05	9.06	20.07	5.08		2.10	41	35	22.59	CETIOM	
BER	86	Mont.	26.05	7.06	14.07	1.08		1.10	41	35	29.03	CETIOM	
BER	86	Mont.	29.05	9.06	15.07	1.08		28.09	41	35	24.37	CETIOM	
NGSOY	86	Auz.	21.04	7.05	2.07			8.10	65	37	44.10	BLANCHET EUROSOYA	7.08 ETM
BER	86	Auz.	21.04	7.05	25.06			1.10	65	37	45.50	BLANCHET EUROSOYA	4.08 ETM
-16	86	Auz.	21.04	7.05	27.06			1.10	65	37	44.70	BLANCHET EUROSOYA	14.07 ETM
NGSOY	87	Mont.	22.04	8.05	5.07		21.09	1.10				CETIOM	
NGSOY	87	Mont.	26.05	5.06	27.07		1.10	9.10				CETIOM	
BER	87	Mont.	22.04	8.05	29.06		7.09	21.09				CETIOM	
BER	87	Auz.	6.04		29.06		15.09		36.3	37	39.30	INRA Auz	R4=26.07
-16	87	Auz.	6.04		30.06		10.09		35.3	37	41.58	INRA Auz	23.07
BER	87	Auz.	6.04		29.06		15.09		52.00	37	41.67	INRA Auz	R4=26.07
-16	87	Auz.	6.04		30.06		10.09		59.32	37	42.37	INRA Auz	23.07
NGSOY	86	Pad.	13.05		8.07		21.09		44.20	50	28.70	UNIV Pad	
BER	86	Pad.	13.05		20.06		7.09		50.00	50	34.20	UNIV Pad	
-16	86	Pad.	13.05		27.06		12.09		36.30	50	36.30	UNIV Pad	

ANNEXE 3

WEBER	V A R N O																
	R1	8.8		8.9		9.0		9.1		9.2		9.3		9.4		9.5	
	OBS	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C
T. 82	175	169	-6	170	-5	172	-3	174	-1	176	+1	178	+3	179	+4	180	+5
T. 83	184	180	-4	184	0	185	+1	186	+2	188	+4	189	+5	190	+6	191	+7
T. 84	184	183	-1	185	+1	187	+3	189	+5	190	+6	191	+7	192	+8	193	+9
T. 85	185	180	-5	182	-3	184	-1	185	0	186	+1	188	+3	190	+5	190	+5
T. 86	195	191	-4	193	-2	194	-1	196	+1	196	+1	198	+3	199	+4	201	+6
T. 87 1er semis	180	172	-8	172	-8	172	-8	176	-4	178	-2	178	+2	181	+1	182	+2
T. 87 2e semis	201	195	-6	199	-2	201	0	201	0	203	+2	205	+4	207	+6	208	+7
T. 85 irri.	186	178	-8	181	-5	183	-3	184	-2	185	-1	186	0	188	+2	189	+3
T. 86 irri.	184	182	-2	184	0	185	+1	186	+2	187	+3	188	+4	191	+7	192	+8
T. 86	176	173	-3	173	-3	173	-3	173	-3	174	-2	176	0	178	+2	180	+4
ES 87	203	195	-8	197	-6	198	-5	198	-5	199	-4	200	-3	200	-3	203	0
ERE A MISER : $\Sigma \frac{(O-C)^2}{n}$		30.4		18.6		11.7		8.1		8.4		13.2		23.6		32.5	

AJUSTEMENT DE VARNO POUR WEBER

KINGSOY	V A R N O																
	R1	8.8		8.9		9.0		9.1		9.2		9.3		9.4		9.5	
	OBS	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C								
T. 82	178	169	-9	170	-8	172	-6	174	-4	176	-2	178	0	179	+1	180	+2
T. 83	185	180	-5	184	-1	185	0	186	+1	188	+3	189	+4	190	+5	191	+6
T. 84	193	183	-10	185	-8	187	-6	189	-4	190	-3	191	-2	192	-1	193	0
T. 85	192	180	-12	182	-10	184	-8	185	-7	186	-6	188	-4	190	-2	190	-2
T. 86	199	191	-8	193	-6	194	-5	196	-3	196	-3	198	-1	199	0	201	+2
T. 87 1er semis	186	172	-14	172	-14	172	-14	176	-10	178	-8	178	-8	181	-5	182	-4
T. 87 2e semis	208	195	-13	199	-9	201	-7	201	-7	203	-5	205	-3	207	-1	208	0
T. 86	183	173	-10	173	-10	173	-10	173	-10	174	-9	176	-7	178	-5	180	-3
T. 85 irri.	193	178	-15	181	-12	183	-10	184	-9	185	-8	186	-7	188	-5	189	-4
T. 86 irri.	197	182	-15	184	-13	185	-12	186	-11	187	-10	188	-9	191	-6	192	-5
ERE A MISER : $\Sigma \frac{(O-C)^2}{n}$												28.9		14.3		11.4	

AJUSTEMENT DE VARNO POUR KINGSOY

RA 172-16	V A R N O																
	R1	8.8		8.9		9.0		9.1		9.2		9.3		9.4		9.5	
	OBS	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C	CAL	O-C
T. 86	188	182	-6	184	-4	185	-3	186	-2	187	-1	188	0	191	+3	192	+4
T. 86	178	173	-5	173	-5	173	-5	173	-5	174	+4	176	-2	178	0	180	+2
T. 87 1er semis	180	172	-8	172	-8	172	-8	176	-4	178	-2	178	-2	181	+1	182	+2
T. 87 2e semis	201	195	-6	199	-2	201	0	201	0	203	+2	205	+4	207	+6	208	+7
ERE A MISER : $\Sigma \frac{(O-C)^2}{n}$		40.25		27.25		24.30		11.25		6.25		6.00		11.50		18.25	

AJUSTEMENT DE VARNO POUR 172 - 16



ANNEXE 4 : découpage du cycle reproducteur

WESER VARNO - 9.1

AN	R1 - R3	R1 - R4	R1 ENDLEAF	R1 ENDSET	R1 - R7	R7 - R8
MONTE LIMAR						
82	24.06	9.07				
83	3.07	16.07				
84	2.07 4.10	25.07				
85	4.07 3.90	25.07				
86	3.07	5.18	30.07	12.75	26.08 17.08 17.09	
86	14.07 4.71	01.08				
87	29.06				15.12 7.09	9.58 21.09
87	20.07 4.02	5.08 8.83	21.08	9.99	17.03 21.09	4.96 1.10
PADOUE						
86	20.06				26.08 15.63 7.09	
AUZEVILLE						
86	25.06			7.67 4.08		
87	29.06	4.81	26.07		16.91 15.09	
MOYENNE						
	4.18	6.27		7.67 11.37	16.35	7.27
% R1 - R7	25	38	47	69	100	

KINGSOY VARNO - 9.5

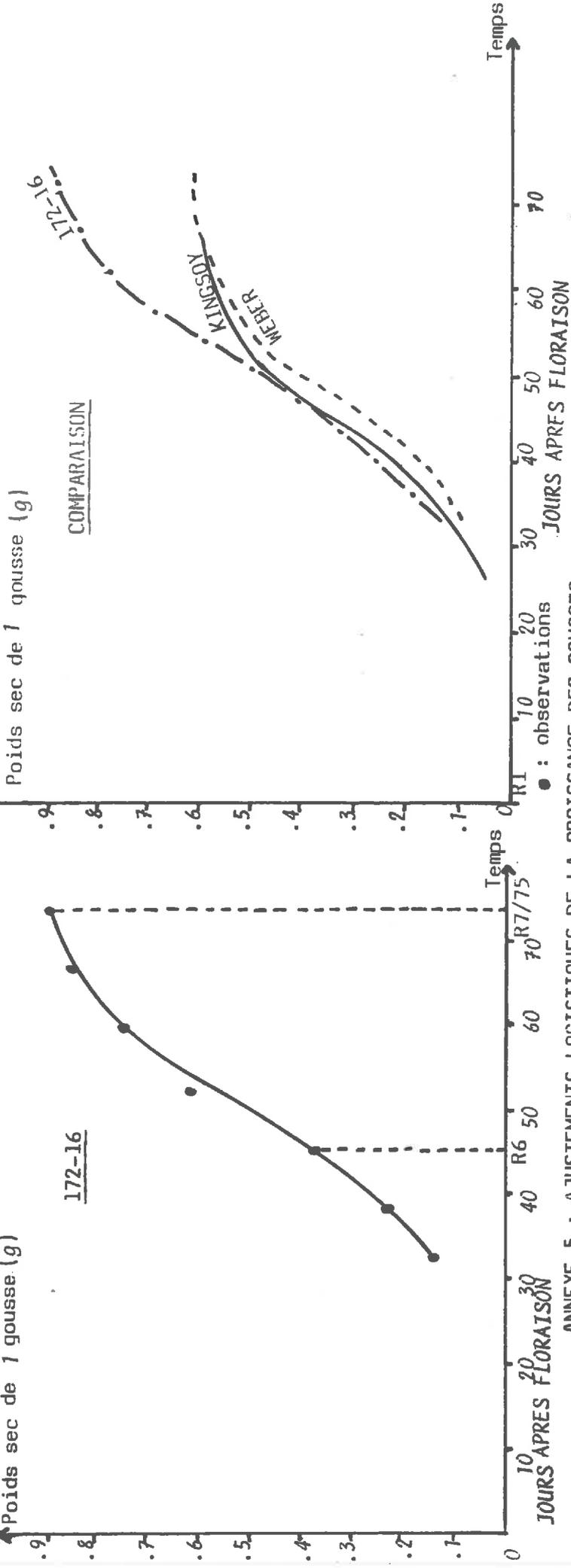
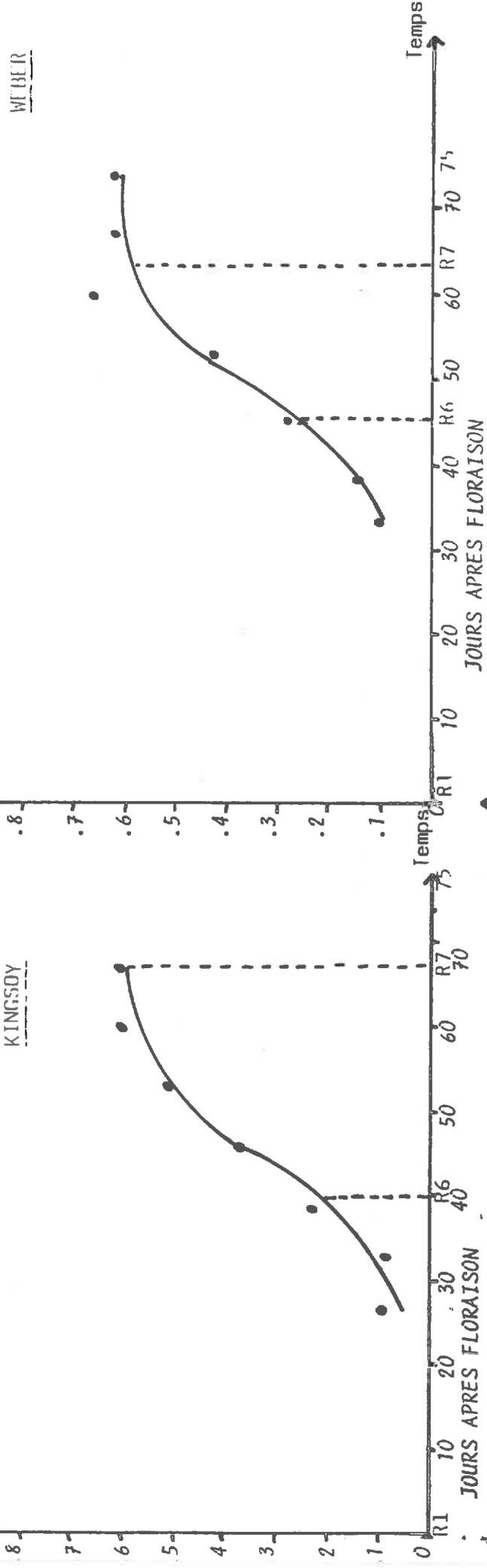
AN	R1 - R3	R1 - R4	R1 ENDLEAF	R1 ENDSET	R1 - R7	R7 - R8
MONTE LIMAR						
82	27.06 1.29	12.07				
83	4.07 1.42	18.07				
84	11.07 2.85	1.08				
85	11.07 2.46	30.07				
86	18.07 3.42	4.08				
86	15.07 2.04	30.07 4.19	6.08	10.45 2.09		
87	5.07				16.76 21.09	4.96 1.10
87	27.07				17.13 1.10	3.65 9.10
PADOUE						
86	8.07				15.10 21.09	
AUZEVILLE						
86	2.07		5.32	7.08		
MOYENNE						
	2.25	4.19	5.32	10.45	16.33	4.30
% R1 - R7	14	26	32	64	100	

INRA 172-16 VARNO - 9.3

AN	R1 - R3	R1 - R4	R1 ENDLEAF	R1 ENDSET	R1 - R7	R7 - R8
MONTE LIMAR						
86	7.07 1.45	21.07 3.61	30.07	7.88	12.08 15.51 17.09	
87	29.06				17.49 19.09	6.25 1.10
87	20.07				18.51 1.10	5.65 9.10
PADOUE						
86	27.06				14.51 12.09	
AUZEVILLE						
86	27.06		1.65	14.07	12.42 10.09	
87	30.06	2.95	23.07			
MOYENNE						
	1.45	3.28	1.65	7.88	15.69	4.95
% R1 - R7	9	21	10	50	100	

WEBER

KINGSOY



ANNEXE 5 : AJUSTEMENTS LOGISTIQUES DE LA CROISSANCE DES GOUSSES

ANNEXE 6

Analyse détaillée du modèle d'évaporation du sol nu en phase de réduction (PERRIER, 1973, 1982)

1. Les bases physiques

Les trois équations de base du modèle sont les suivantes (voir tableau pour les symboles):

$$1) \Sigma^t ES(t) = L. [s. (H_i - H_a). x(t) + L. q. t$$

$$2) r_s(t) = x(t) / D$$

$$3) ES = EP / \left(1 + \frac{\Gamma}{P' + \Gamma} * \frac{r_s(t)}{ras} \right)$$

L'équation 1 explique que l'évaporation du sol est alimentée par la couche de surface d'épaisseur $x(t)$ et par la profondeur. L'alimentation de profondeur sera négligée dans la suite du raisonnement, supposée petite devant ΣES ; ce qui ne se justifie plus quand la culture devient couvrante, mais alors ES est négligeable devant TP .

L'équation 2 lie la résistance du sol à l'évaporation avec l'épaisseur du mulch et le coefficient de diffusion, D . Ce dernier étant difficilement accessible, on peut l'exprimer en fonction :

du coefficient de diffusion relatif	$D = D_o * (D/D_o)$
de la porosité-tortuosité	$D = D_o * (\epsilon/a^2)$
(BALL, 1981; CURRIE, 1960; RENAULT, 1988)	

Dans l'équation 3, EP est l'évaporation potentielle théorique (supposant toutes les surfaces saturées). Elle explique que la réduction de l'évaporation réelle instantanée (par rapport à l'évaporation potentielle) est fonction de la résistance du sol par rapport à celle de l'air.

la combinaison des 3 équations aboutit à la formule simplifiée suivante :

$$E ES = \sqrt{2A. \Sigma EP + A^2} - A$$

et $A = 1/2. L. ras. (P' + \Gamma) / \Gamma. D. [s. (H_i - H_a)$
 EP étant pris égal à ES_0 , ce qui est justifié pour une surface inerte comme le sol.

Cette expression analytique suppose

- d'une part que les gradients d'humidité et de température dans le mulch sont négligeables, et que celui-ci peut être caractérisé par une valeur homogène de température T_s et d'humidité H , ce qui semble relativement admissible,
- d'autre part que le terme $(1 + (\Gamma / (P' + \Gamma)) * r_s(t) / ras)$ ne varie pas au cours du temps. Cette condition est plus diffi-

cile à remplir puisque température et vitesse du vent influent fortement sur le calcul de P, Γ et surtout ras. On pourrait envisager d'effectuer le calcul à des pas de temps relativement faible, pour respecter cette condition, mais ceci conduit à un calcul numérique complexe.

Il est donc nécessaire d'accepter cette approximation, en donnant à A une valeur moyenne résultant de la valeur moyenne des paramètres mis en jeu.

SYMBOLES UTILISES POUR LE CALCUL DE A

- L = chaleur latente de vaporisation de l'eau dans l'air
- ρ_s = densité apparente du sol
- H_i = humidité pondérale initiale du sol
- H_a = humidité pondérale du sol sec
- x = épaisseur du mulch
- D = coefficient de diffusion moléculaire dans le mulch
- D_o = coefficient de diffusion moléculaire à l'air libre
- D/D_o = coefficient de diffusion relatif du mulch
- ϵ = porosité libre à l'air
- r_s = résistance du sol à l'évaporation
- ras = résistance aérodynamique à la surface du sol
- P' = dérivée de la pression de vapeur saturante en fonction de la température
- Γ = constante psychrométrique totale ($\delta + \delta r$)
- δ = constante psychrométrique (.66 mb°C⁻¹)
- δr = constante psychrométrique radiative (Perrier, 1982)
- σ = constante de Stefan-Boltzman (5.67 10⁻⁸)
- at = tortuosité
- T_s = température de surface
- T_a = température de l'air
- ρ_{cp} = 1300
- arg = taux d'argile

Tableau

2. Discussion sur le terme A

$$A = 1/2 \cdot \underbrace{(L \cdot ras \cdot (P' + \Gamma) / \Gamma \cdot D_o)}_{A \text{ clim}} * \underbrace{(D/D_o \cdot \rho_s \cdot (H_i - H_a))}_{A \text{ sol}}$$

A se décompose en un terme lié à l'état de l'atmosphère au dessus du sol (A clim), et un terme lié à la structure et à l'humidité dans le mulch (A sol).

Le terme A clim fait intervenir les paramètres suivants.

.L (Jm⁻³) = 2.49 10⁹ - 2.25 10⁶.Ts (°C)
selon CHUNG et HORTON, 1987

.P' est fonction de (Ts+Ta)/2

. Γ = $\delta(1 + 4\sigma \cdot ((Ts+Ta)/2)^3 \cdot ras / \rho_{cp})$
avec Ts et Ta en °K

CALCUL DE Ra

$z_0 = 1\text{mm}$
 $z_{oh} = z_0/5 = 0.2\text{mm}$
 $k = 0.4$
 $z = 2\text{m}$
 $u(z) = u^*/k \log(z/z_0)$
 $u(2\text{m}) = 19 \cdot u^*$
 donc $0.05 < u^* < 0.5 \text{ m/s}$

1) calcul de ra en neutralité

$1/ra = k \cdot u^* / \log(z/z_{oh})$
 an : $1/ra = 4.35 \cdot 10^{-2} u^*$

2) correction d'instabilité (se fixer $H=200\text{W/m}^2$ et $T=300\text{K}$)

$L = - \int C_p \cdot T \cdot u^{*3} / (k \cdot g \cdot H)$
 où $\int C_p = 1300$ et $g = 9.81$
 an : $L = -u^{*3} \cdot 10^5 / H$

Les corrections d'instabilité sont difficiles pour $z/-L < 1$, donc le calcul n'est valable qu'à partir de $u^*=0.2\text{m/s}$

$1/ra = k \cdot u^* / (\log(z/z_{oh}) - \phi(z/L))$

et $\phi(z/L) = 2 \cdot \log \left(\frac{1 + \sqrt{1 - 16z/L}}{2} \right)$

ra au niveau du sol ($z_0=1\text{mm}$)
 $H=200\text{W/m}^2$ $T=300\text{K}$

■ neutralité
 + cor. insta.

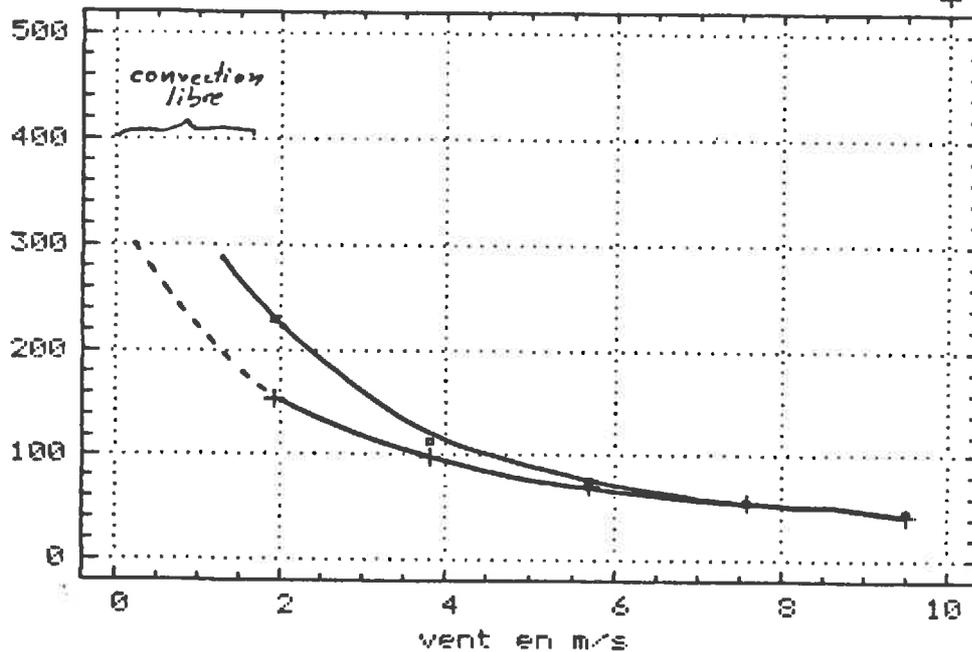


figure 1 : calcul approché de la gamme de variation de ras

.ras : pour une rugosité donnée (ici 1mm), ras est fonction essentiellement de la vitesse du vent, elle doit être corrigée par un coefficient d'instabilité en condition de forts gradients thermiques entre la surface du sol et le niveau de référence (Ts-Ta élevée).

Donc $A_{clim} = f(Ts, Ta, ras)$

Sa variabilité est liée à la variation de ces 3 paramètres. Nous nous placerons dans des conditions de sol sec et en milieu de journée, ce qui implique :

- . Ts-Ta élevée
- . l'introduction de la correction d'instabilité dans l'estimation de ras
- . Ta = Tmaxi

L'utilisation de la relation simplifiée proposée par Seguin (1983) pour un sol nu : $Ts - Tmaxi = 1 - (ES - RNET) / 0.25$, où ES et RNET sont des flux journaliers, couplée à une série de simulations itératives ($0.5 < A < 2.5$) permettant de calculer ES dans de multiples conditions de sol et de climat, nous a permis de calculer Ts-Ta. On remarque qu'en fin de déssechement Ts-Ta est de l'ordre de 20°C.

Par ailleurs, un calcul approximatif (voir encadré ci-contre) nous a permis d'établir le graphique 1, qui montre qu'en conditions d'instabilité et pour une gamme de vitesse du vent allant de 1 à 5m/s, ras varie entre 80 et 250 s/m (pour une faible vitesse du vent, les phénomènes liés à la convection libre tendent à faire plafonner ras et 250 s/m correspond à une borne évaluée au maximum).

Nous prendrons $25^{\circ}C < Ta < 35^{\circ}C$.

variabilité du terme climat A clim en mm	Ta = 25°C	Ta=35°C
ras = 80 s/m	L = 571 cal/g P' = 3.11 Γ = 0.93 Do = 29.9 10 ⁻⁶ A clim = 9.6	L = 566 P' = 5.00 Γ = 0.96 Do = 31.5 10 ⁻⁶ A clim = 14.3
ras = 250 s/m	L = 571 cal/g P' = 3.11 Γ = 1.49 Do = 29.9 10 ⁻⁶ A clim = 21.3	L = 566 P' = 5.00 Γ = 1.59 Do = 31.5 10 ⁻⁶ A clim = 29.9

Tableau variabilité de A clim

Ces calculs soulignent la grande variabilité induite par la vitesse du vent.

$$9.6 < A_{clim} < 29.9$$

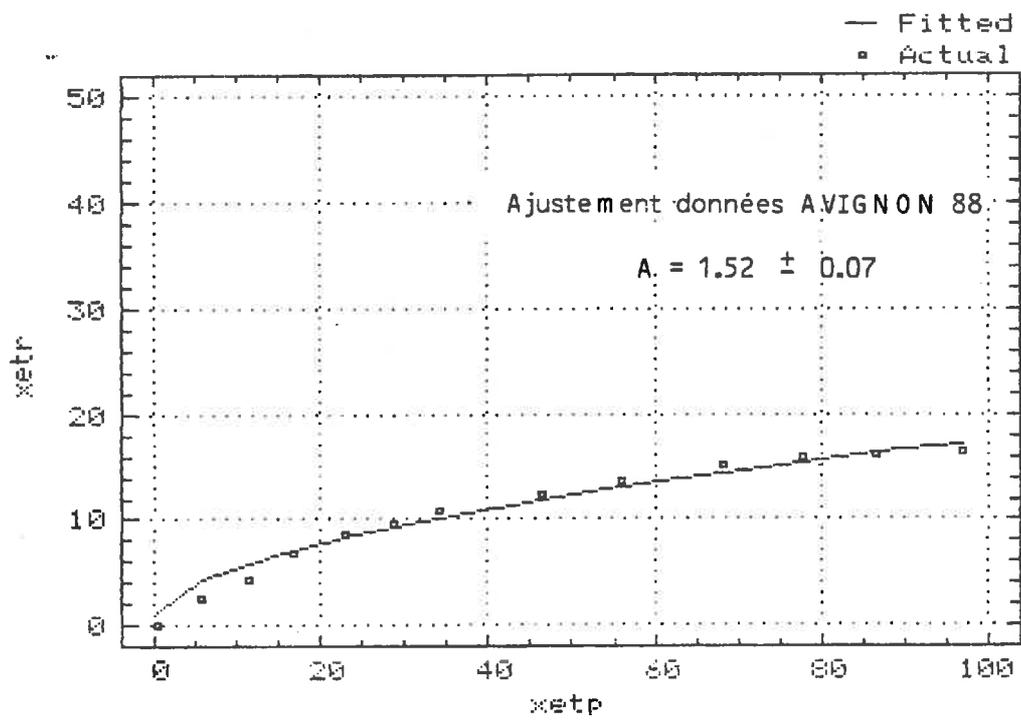


figure 2

Quant au terme Asol, il dépend des paramètres suivants.

. f_s en surface varie entre 0.9 et 1.2 (HALL et al., 1977)

. $D/Do = (\epsilon - Ha)^{5/3}$ (BRUCKLER et al., 1987)
 et $\epsilon = 1 - f_s/2.7$

. Ha : BRUCKLER et al. (1987) et CHANZY (1989) proposent les valeurs expérimentales suivantes: $Ha = 3\%$ pour $arg = 27\%$.

A ce niveau élevé de potentiel, nous pouvons faire l'hypothèse que l'eau est entièrement contenue dans la fraction argileuse (Bruckler, communication personnelle) et calculer le rapport constant pour tout type de sol :

$$H_{apu} = Ha/arg = 3/27 = .11$$

$$\text{d'où } H_a = 0.11 \text{ arg}$$

. H_i : nous supposons que le sol se trouve à la capacité au champ.

En tenant compte de tous ces éléments, nous pouvons estimer la variabilité de Asol.

pour $ha=3\%$:

	$f_s=0.9$	$f_s=1.2$
ϵ	0.67	0.56
D/Do	0.47	0.35
$f_s(D/Do)$	0.42	0.42

.5% < Ha < 5%

8% < H_i < 38% selon JAMAGNE et al., 1977

L'essentiel de la variabilité du terme sol provient des termes H_i et Ha .

$$.03 < A \text{ sol} < 0.13$$

3. Validation du modèle et du calcul de A sur un jeu de données expérimentales

Nous disposons d'un jeu de mesures d'évaporation réelle d'un sol nu (Chanzy, 1989) sur un site muni d'une station météorologique (INRA-Avignon). Le dessèchement s'est déroulé sur 25 jours sans interruption. Ces mesures nous permettent d'accéder au paramètre A de deux façons :

- par ajustement statistique des mesures à la formule de PERRIER.
- par calcul, en utilisant les mesures météorologiques observées au moment du dessèchement.

Le calcul d'ajustement (figure 2) donne :

$A = 1.52 \pm 0.07$ avec $r^2 = 0.97$. La fiabilité des mesures (CHANZY, com. perso.) nous a conduit à introduire un terme d'erreur de $\pm 0.2\text{mm}$ sur les résultats d'évaporation journalière. Nous obtenons alors : $A = 1.56 \pm 0.44$. Donc $1.12 < A \text{ observé} < 2.00$

A titre de comparaison, l'utilisation d'une formule empirique telle que la propose BOESTEN et STROONIJDER (1985) donne un ajustement aussi fiable :

$$\Sigma ES = \beta \sqrt{\Sigma ESO} \quad \text{avec } \beta = 1.75 \pm 0.04 \quad \text{et } r^2=0.97$$



Le calcul, en tenant compte des paramètres sol : $f_s=1.2$, $H_i=33\%$, $H_a=3\%$, et des paramètres météorologiques rassemblés dans le tableau suivant, nous donne:

sur l'ensemble de la période de dessèchement $T_a=30^\circ\text{C}$ $T_s=54^\circ\text{C}$			
vent (m/s)	moyen:1.8	mini:0.9	maxi:4.2
ras (s/m)	158	250	90
A (mm)	1.32	1.77	1.00

Donc $1.00 < A \text{ calculé} < 1.77$

Il ressort donc que, globalement, le calcul analytique de A est en assez bon accord avec le résultat expérimental, même si la valeur calculée apparaît inférieure à celle observée, ce qui pourrait s'expliquer par la non prise en compte de la réalimentation du mulch par la profondeur. Cette constatation nous permet d'envisager l'utilisation du modèle analytique de PERRIER pour l'estimation de l'évaporation du sol nu, en fixant la valeur de A la mieux adaptée à son utilisation dans un modèle de type agrométéorologique.

4. Calcul approché de A pour l'utilisation dans le modèle

Il nous apparaît raisonnable de choisir un niveau de vent moyen de 2m/s, soit $\text{ras} = 160\text{s/m}$ et $A_{\text{clim}} = 19.7$, et de retenir $f_s=1$, donc :

$$A = 9.85 (.63 - H_a)^{1.67} (H_i - H_a)$$

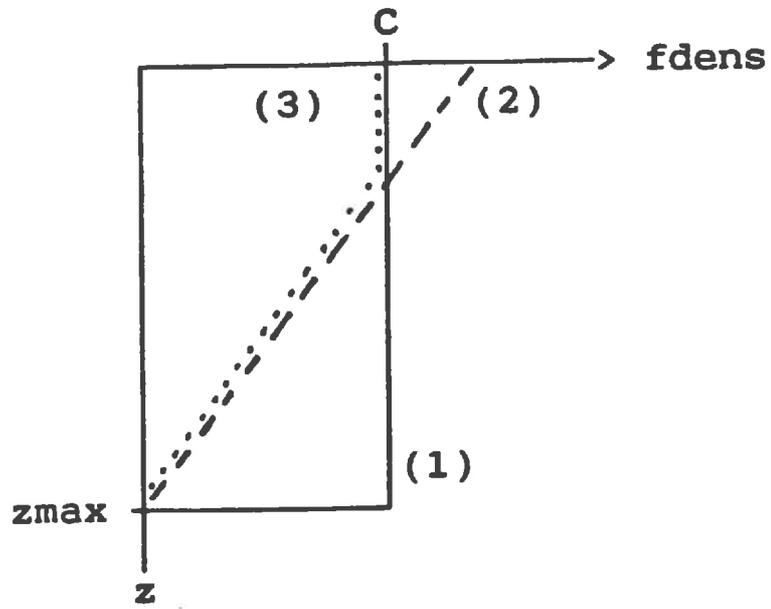


figure 1

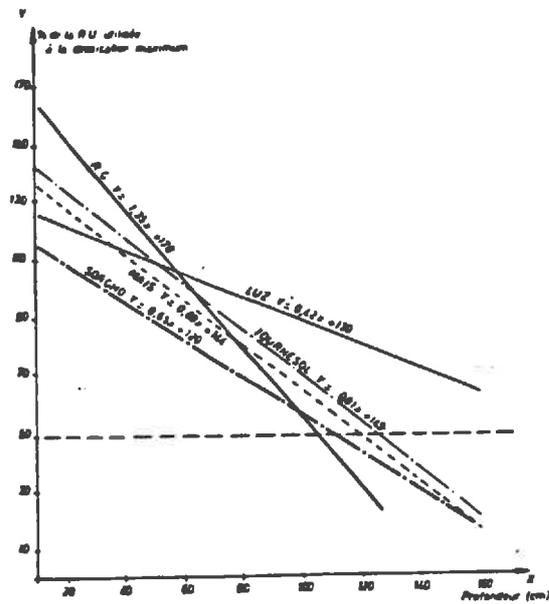


figure 2

Utilisation de la réserve utile en eau du sol en fonction de la profondeur.

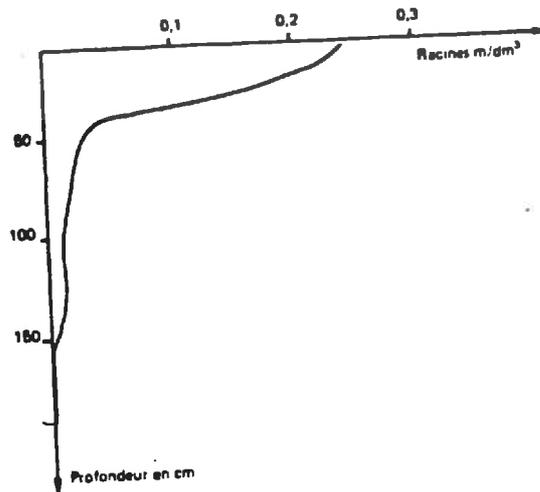


figure 3

Profil racinaire (m de racines/dm³ de sol) de soja.

Elaboration d'une fonction de densité racinaire

Nous souhaitons estimer la densité racinaire, et son évolution par une fonction simple, $fdens(z)$, telle que $fdens(z) = rmax/ru$, où $rmax$ correspond à la quantité d'eau maximale disponible pour la plante (en mm/cm de sol) et ru est la réserve utile unitaire ($(Hcc-Hpfp)/s$ en mm/ cm de sol).

1. Forme de la fonction.

Plusieurs solutions sont possibles (figure 1).

- $fdens(z) = C$ tout au long du profil
C'est la solution la plus courante avec
 $C = 1$ et donc $RMAX = zmax * ru$

- $fdens(z) = - a*z + b$
C'est la solution proposée par MAERTENS (1987) à partir de mesures de profils hydriques in situ. Les paramètres a et b varient en fonction de l'espèce (figure 2), et selon l'espèce et la profondeur les mesures montrent que le rapport $rmax/ruz$ peut varier entre 0.2 et 1.7.
Il est probable qu'en surface, l'augmentation importante de réserve observée soit due à l'évaporation du sol. Cela concerne donc de l'eau non disponible pour la plante, comme nous l'avons vu dans la partie consacrée à l'évaporation du sol nu.

- $z < \text{seuil}$ $fdens(z) = C$
 $z \geq \text{seuil}$ $fdens(z) = - a*z + b$

Nous proposons cette dernière solution, parcequ'elle semble mieux tenir compte du profil réel de densité racinaire (figure 3), qui montre que :

.jusqu'à une certaine profondeur la densité racinaire est élevée. On supposera qu'elle est non limitante vis à vis de l'utilisation de l'eau mise à disposition par le sol, c'est-à-dire que la distance maximale entre deux racines ne constitue pas un obstacle à l'absorption (voir description du modèle de Ritchie), ce qui est confirmé par les observations de Tardieu (figure 4) qui montrent que la profondeur-limite peut varier entre 30 cm (profondeur de labour) et 70 cm selon la compaction du sol (chez le maïs). L'influence du compactage du sol sur la capacité de la plante à extraire l'eau a également été étudiée par FEDDES et al. (1988).

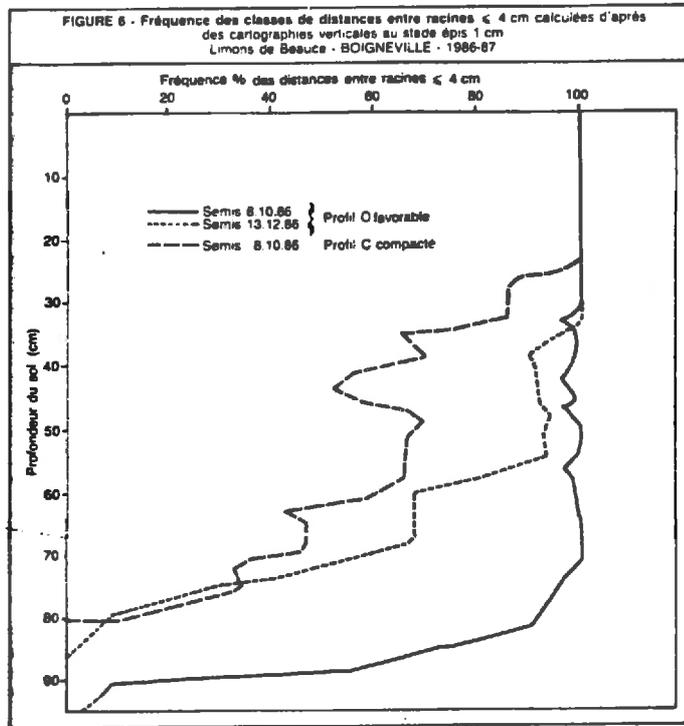


Figure 4
D'après Tardieu, 19

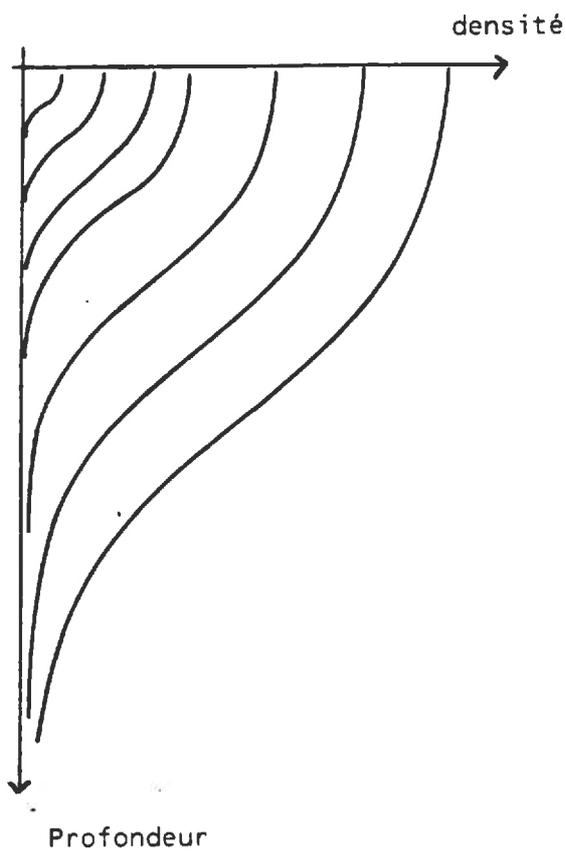


Figure 5
Evolution probable du profil de densité racinaire

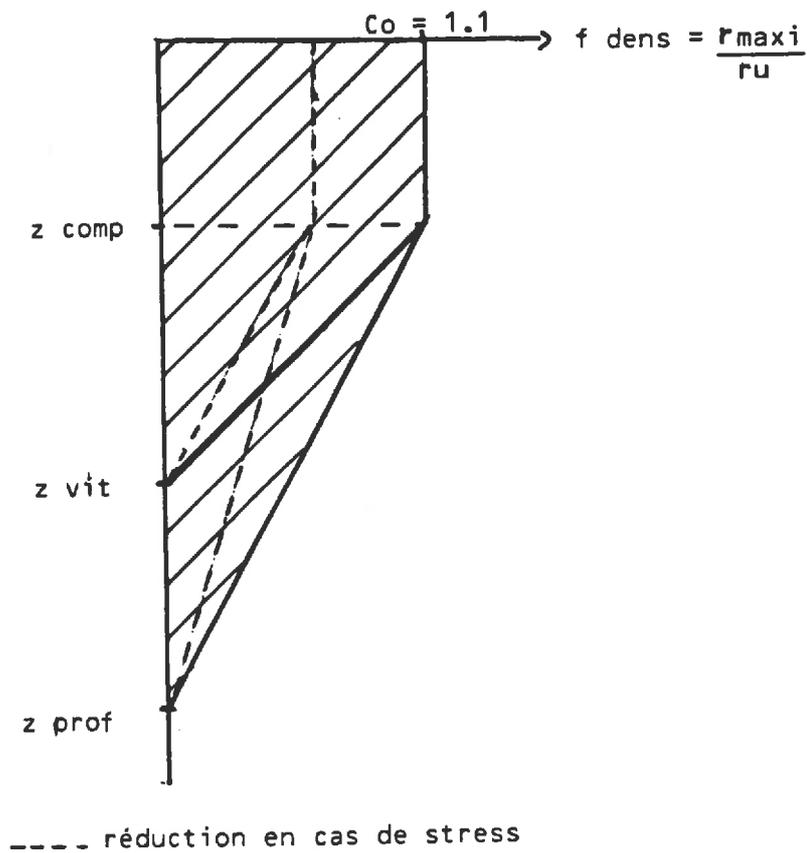


Figure 6
Schéma simplifié pour 1 fonction de densité racinaire

. plus profondément, la densité racinaire diminue de façon quasi-linéaire et s'annule à 180 cm environ.

Pour tenir compte à la fois des observations qui montrent que la plante est capable d'extraire l'eau du sol à des potentiels supérieurs au pF4.2 et de la constante de drainage, nous prendrons $C = 1.1$.

2. prise en compte de l'évolution du système racinaire

Compte-tenu de l'évolution du profil de densité racinaire schématisée par la figure 5, nous proposons de faire évoluer $f_{dens}(z)$ selon un schéma simple (figure 6) défini par 3 limites :

- * la limite de compaction (z_{comp}) entre 30 et 70 cm
- * la limite de croissance racinaire maximale (z_{prof}) entre 160 et 200 cm
- * la limite de vitesse, limite fictive qui détermine la vitesse de croissance de la densité (z_{vit}).

Si les deux premières limites sont liées à des observations in situ du système racinaire (MAERTENS, 1987; TARDIEU, 1988; MASSE et al., 1988), la limite de vitesse apparaît d'avantage comme un paramètre d'ajustement. Néanmoins, on peut penser que le caractère pivotant d'un système racinaire va se traduire par une limite de vitesse élevée. La figure 7 illustre le rôle de ce paramètre, qui va jouer en particulier en conditions sèches : le choix de z_{vit} faible implique une croissance accélérée de la densité racinaire et de R_{MAX} , ce qui provoque une consommation rapide de la réserve totale et un stress précoce. Ce stress va limiter la croissance foliaire (lai maximal de 4.5 au lieu de 6) à un niveau optimal et par suite augmenter le rendement.

Nous avons choisi de fixer ces paramètres pour le soja aux valeurs suivantes :

$z_{comp} = 50$ cm, $z_{prof} = 180$ cm et $z_{vit} = 120$ cm.

Rôle du paramètre ZVIT

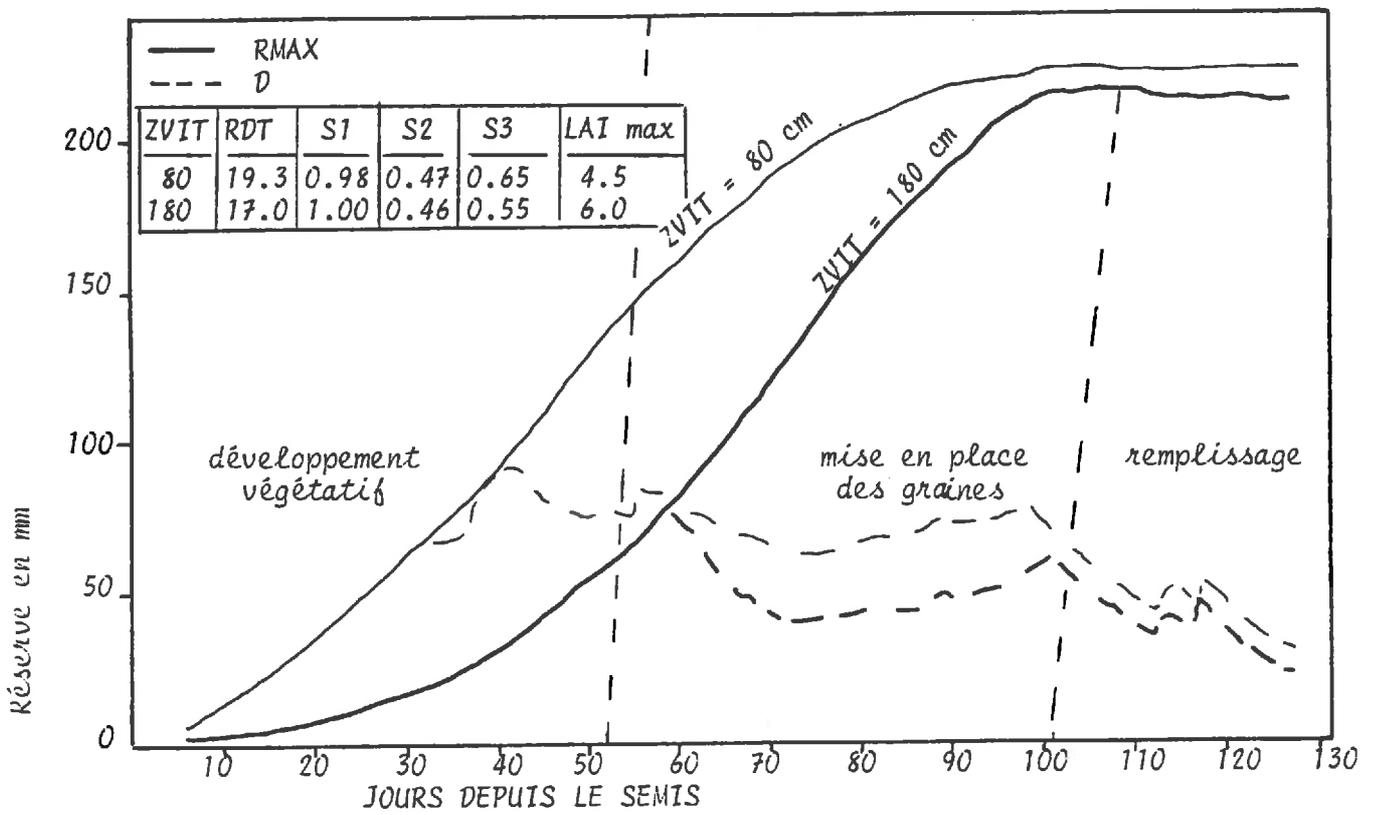


Figure 7

ANNEXE 8 : analyse de variance de la biomasse et du LAI par rapport aux données d'entrée du modèle de bilan hydrique

Dependent Variable: LAI

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	239	2682.997214	11.225930	24.96	0.0
Error	2095	942.137904	0.449708		
Corrected Total	2334	3625.135119			
	R-Square	C.V.	Root MSE	LAI Mean	
	0.740110	25.19598	0.670603	2.66154604	

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
IRI	1	1206.406509	1206.406509	2682.65	0.0
RU	4	39.717868	9.929467	22.08	0.0001
IRI*RU	4	21.112562	5.278141	11.74	0.0001
PROF	7	195.552641	27.936092	62.12	0.0001
IRI*PROF	7	18.067513	2.581073	5.74	0.0001
RU*PROF	28	1.844540	0.065876	0.15	1.0000
IRI*RU*PROF	28	9.180047	0.327859	0.73	0.8479
RO	2	864.699300	432.349650	961.40	0.0001
IRI*RO	2	74.392241	37.196121	82.71	0.0001
RU*RO	8	47.773731	5.971716	13.28	0.0001
IRI*RU*RO	8	1.633773	0.204222	0.45	0.8885
PROF*RO	14	166.831849	11.916561	26.50	0.0001
IRI*PROF*RO	14	25.884621	1.848901	4.11	0.0001
RU*PROF*RO	56	4.467905	0.079784	0.18	1.0000
IRI*RU*PROF*RO	56	5.432114	0.097002	0.22	1.0000

Dependent Variable: TOPWT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	239	130048830.6	544137.4	44.11	0.0
Error	2095	25844069.5	12336.1		
Corrected Total	2334	155892900.1			
	R-Square	C.V.	Root MSE	TOPWT Mean	
	0.834219	23.76790	111.0679	467.301927	

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
IRI	1	95584812.07	95584812.07	7748.40	0.0
RU	4	1870581.72	467645.43	37.91	0.0001
IRI*RU	4	543217.82	135804.46	11.01	0.0001
PROF	7	13478298.57	1925471.22	156.08	0.0001
IRI*PROF	7	2272671.37	324667.34	26.32	0.0001
RU*PROF	28	80198.65	2864.24	0.23	1.0000
IRI*RU*PROF	28	816946.81	29176.67	2.37	0.0001
RO	2	9002505.79	4501252.90	364.89	0.0001
IRI*RO	2	550884.90	275442.45	22.33	0.0001
RU*RO	8	1405152.72	175644.09	14.24	0.0001
IRI*RU*RO	8	80937.40	10117.17	0.82	0.5847
PROF*RO	14	3322315.28	237308.23	19.24	0.0001
IRI*PROF*RO	14	448190.80	32013.63	2.60	0.0010
RU*PROF*RO	56	307342.60	5488.26	0.44	0.9999
IRI*RU*PROF*RO	56	284774.13	5085.25	0.41	1.0000

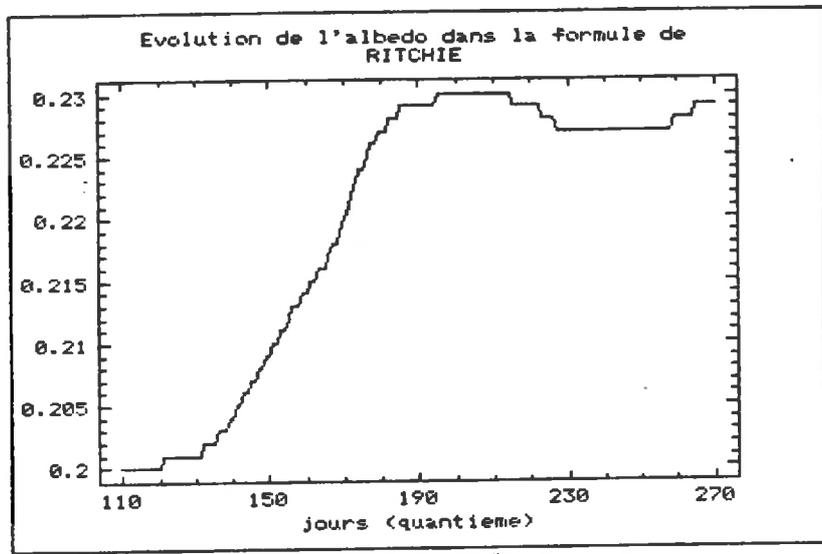


figure 1

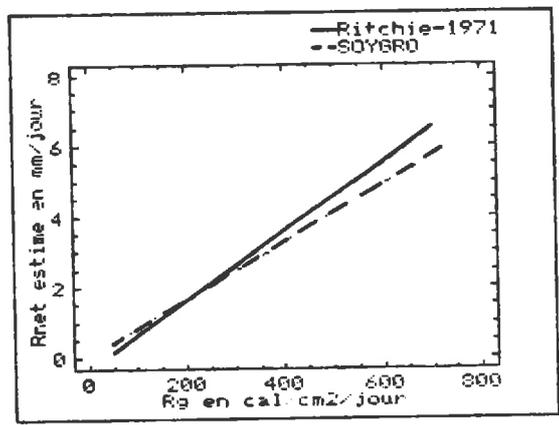


figure 2

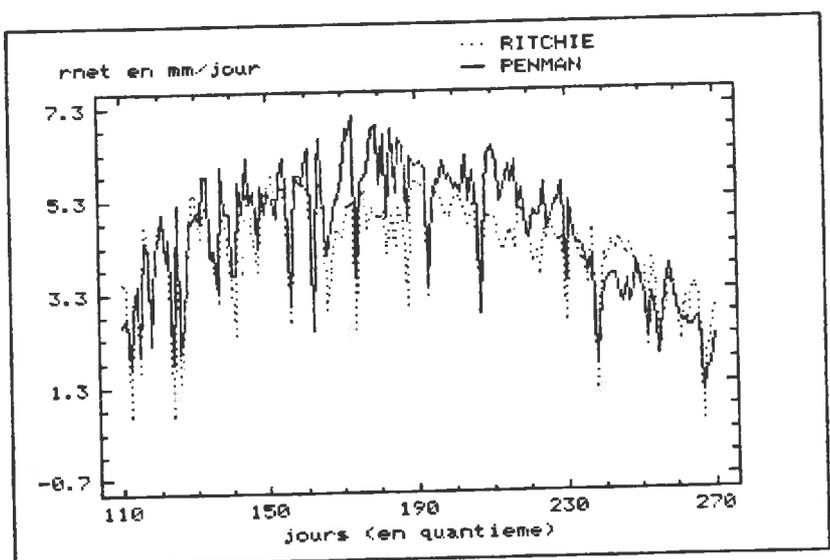


figure 3

ANNEXE 9

Analyse de la formule empirique donnant l'évaporation à l'équilibre selon RITCHIE

Selon RITCHIE (1985),

$$EEQ = RG \times (1 - 0.9 a) \times 2.04 \cdot 10^{-4} \times (TD + 29) \quad (1)$$

où RG est le rayonnement global exprimé en cal/cm²/jour

a est l'albédo qui évolue avec l'indice foliaire (figure 1)

TD est une température journalière pondérée

$$(TD = 0.6 TMAX + 0.4 TMIN)$$

Cette estimation empirique comporte deux approximations liées :

- au calcul du rayonnement net (RN)

- au calcul du rapport P'/(P'+δ)

puisque $EEQ = RN \times P'/(P'+\delta)$

Ainsi, la formule (1) semble pouvoir se décomposer en :

$$EEQ = \underbrace{RG \times 10^{-2} \times (1 - 0.9 a)}_{RN \text{ (en mm)}} \times \underbrace{2.04 \cdot 10^{-2} \times (TD + 29)}_{P'/(P'+\delta)}$$

Ajustement du rayonnement net RN

Dans un précédent article (1971), RITCHIE propose la formule suivante :

$$RN = 1.22 \cdot 10^{-2} RG (1 - a) - 0.32$$

Dans CERES-Wheat et donc SOYGRO, RITCHIE utilise une formule empirique très proche de celle de 1971 (figure 2). Dans ces formules il semble que l'énergie radiative de grande longueur d'onde soit négligée (rayonnement atmosphérique et du sol).

La comparaison entre l'estimation de RITCHIE et la formule de PENMAN ne fait pas apparaître de biais systématique (figure 3).

Par ailleurs, l'introduction d'un albédo évolutif chez RITCHIE ne joue pas sur les relations entre la valeur de RITCHIE et celle de PENMAN (figure 4).

On peut donc penser que la surestimation de EEQ (cf texte) ne provient pas de l'évaluation du rayonnement net.

Ajustement de P'/(P'+δ)

On constate en revanche que le second terme est fortement surestimé (figure 5), ce qui explique la surestimation de EEQ. Dans nos régions, la formule préconisée par WILSON et ROUSE (1972) semble mieux adaptée (figure 6):

$$P'/(P'+\delta) = 0.48 + 0.01 T \text{ (°C)}$$

Il faut toutefois rester prudent dans l'utilisation de ces formules empiriques, car rétablir ce terme nécessiterait de prendre également une valeur de τ (coefficient de PRIESTLEY-TAYLOR) adaptée aux conditions régionales.

Ne vaut-il pas mieux, dans le cas où la formule de PENMAN ne peut être mise en oeuvre, utiliser globalement la formule empirique la mieux adaptée à la région (SEGUIN, 1975) ?

Tests effectués pour AVIGNON, 1986

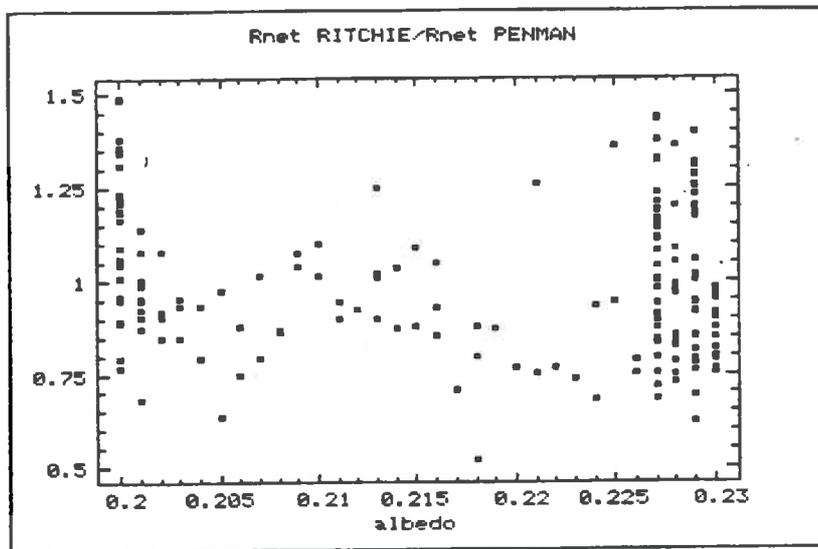


figure 4

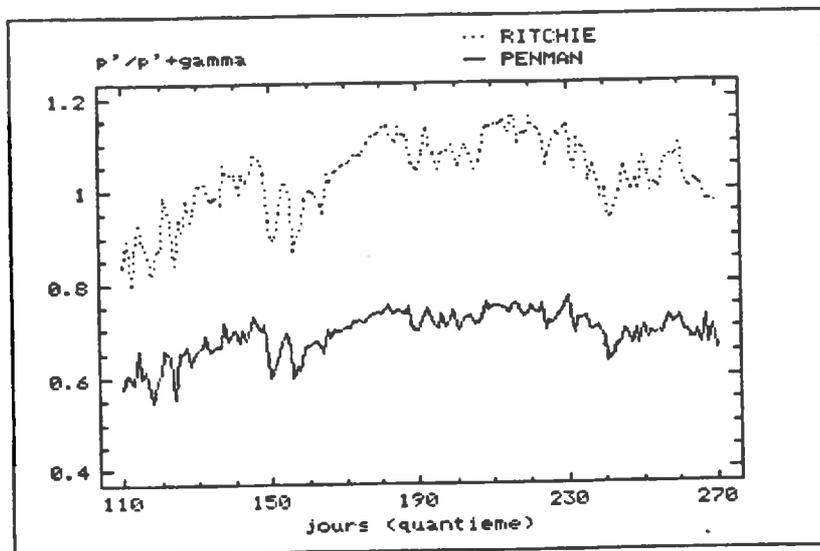


figure 5

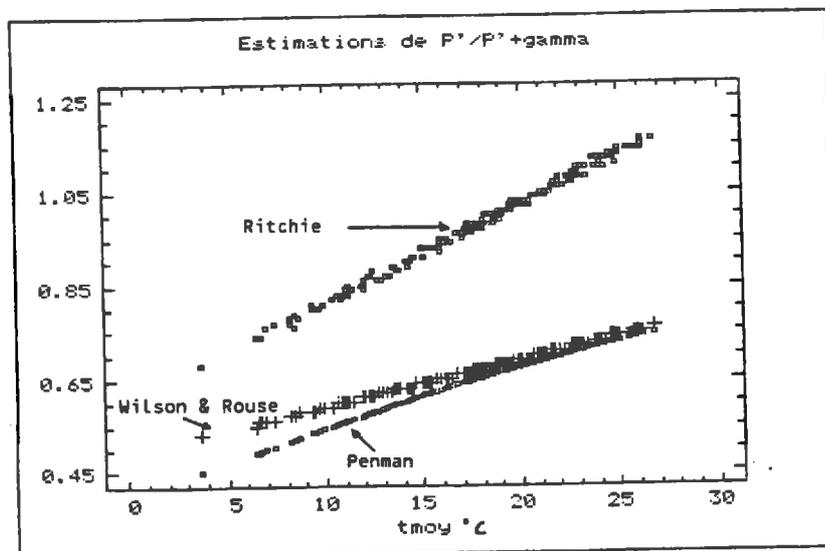


figure 6

ANNEXE 10

LISTE DES PARAMETRES OU VARIABLES D'ENTREE
PREMIERE PARTIE

•	
A	assimilation nette journalière (g/jour/m ²)
AGEFAC	réduction de la photosynthèse par les remobilisations azotées (su)
AVPHT	facteur d'avortement photothermique (su) ¹
AVTRO	facteur d'avortement trophique (su)
C ₃₀	coefficient d'entretien à 30°C (g CH ₂ O/g MS/heure)
Dr	composante thermique de la fonction photothermique (UTN)
Drac	fonction thermique journalière pour le calcul de la croissance racinaire (°C)
Durée max	paramètres de la courbe de
Durée min	
durnuit	durée de la nuit (heures)
Dv	fonction thermique journalière (UT)
E	efficacité de croissance globale (g MS/g CH ₂ O)
ec	efficacité de croissance de la cosse (1.49 g CH ₂ O/ g MS)
ef	efficacité de croissance de la feuille (1.61 g CH ₂ O/ g MS)
eg	efficacité de croissance de la graine-photosynthétats (2.08 g CH ₂ O/ g MS)
ENDLEAF=NDLEAF	stade fin du développement végétatif
ENDSET = NDSSET	stade fin floraison
KPF	stade phénologique épaississement des feuilles
er	efficacité de croissance de la graine-remobilisations azotées (1.45 g CH ₂ O/ g MS)
era	efficacité de croissance de la racine (1.37 g CH ₂ O/ g MS)
et	efficacité de croissance de la tige (1.44 g CH ₂ O/ g MS)
F(T)	effet de la température sur la respiration selon Mc Cree (1974)
FT(h)	facteur thermique horaire
IP	index plastochronique (IP=1/TRIFOL en UT/noeud formé)
JPEND	stade fin de la phase juvénile
LAI	indice foliaire (su)
LAI _n	indice foliaire normalisé = $\delta_{ep} \times LAI$ (su)
M ₀ max	quantité maximale de protéines remobilisables par jour (g/jour/m ²)
N	composante photopériodique de la fonction photothermique (UTN)
NF %	teneur en azote des feuilles (%)
Nuit max	ou seuil photopériode
Nuit min	
PAR	rayonnement photosynthétiquement actif (en stein/m ² /j)
PG	photosynthèse brute (g CH ₂ O/jour/m ²)
PGAVL	assimilats disponibles pour la croissance (g CH ₂ O/jour/m ²)
PGFAC	réduction de la photosynthèse par l'indice foliaire (su)
PGFAC=	valeur asymptotique de PGFAC (su)
PGLEFT	assimilats utilisés pour les cosses (g CH ₂ O/jour/m ²)
PGmax	photosynthèse brute maximale (g CH ₂ O/jour/m ²)
PGPD	assimilats utilisés pour les graines (g CH ₂ O/jour/m ²)
PODADD	production journalière de gousses (nb gousses/m ² /jour)
PODSTART	= R3 = NPODO : stade premières gousses
PODVAR	potentiel génétique de fleurs (nb fleurs/m ² /jour)
PR ₀	pool de protéines remobilisables (g/m ²)
R	fonction photothermique journalière (UPT)
Ra(ov.c)	remobilisations azotées (g/jour/m ²)
RO	stade induction florale
R1	stade floraison
R1-R7	durée floraison-maturité (UPT)

1(su) = sans unité



R4 stade gousse
R7 stade maturité physiologique
R7-R8 durée maturation (UT)
R8 stade maturité de récolte
R_B respiration d'entretien de base (g CH₂O/jour/m²)
R_C respiration de croissance
R_E respiration d'entretien (g CH₂O/jour/m²)
R_{OP} g CH₂O respirés / g CH₂O fixés par photosynthèse
RP terme de respiration d'entretien correctif pour les protéines enzymatiques des feuilles (g CH₂O/jour/m²)
s
S (ov) sénescence (g/jour/m²)
SDMAX croissance maximale des grains (mg/jour/grain)
SDPDVE nombre de graines/gousse
SDVAR croissance génétique maximale des grains (mg/jour/grain)
SENES sénescence due au stress hydrique (g/jour/m²)
SENMAX sénescence totale admissible (% MS foliaire)
SHMAX croissance maximale des cosses (mg/jour/cosse)
SHVAR croissance génétique maximale de cosses (mg/jour/cosse)
SIZELF surface d'une feuille témoin (cm²)
SLA surface spécifique (cm²/g)
SLAVAR surface spécifique témoin (cm²/g)
SPCNG régularité de l'espacement (su)
SWFAC facteur de stress hydrique stomatique (su)
T(h) température horaire (°C)
TMAX température de développement maximale (°C)
TMIN température de développement minimale (°C)
TMFAC facteur de réduction thermique de la croissance des graines et gousses (su)
TOPT température de développement optimale (°C)
TPHFAC réduction de la photosynthèse par la température (su)
TRIFOL nombre de noeuds apparaissant par UT
TURFAC facteur de stress de turgescence (su)
sep coefficient d'extinction photosynthétique (su)
UPT unité de développement photothermique
UT unité de développement thermique journalière
UTN unité thermique nocturne
UTR unité de développement thermique racinaire
VE stade levée
VI stade ième noeud
W (ov,c,gr) croissance en masse (globale ou par organe) g/jour/m²
WE masse de matière sèche à entretenir (g/jour/m²)
WTLF poids sec de feuilles (g/m²)
X (ov,c,gr) coefficient de répartition (su)
r5 mesure de la vitesse des remobilisations azotées (su)

LISTE DES PARAMETRES OU VARIABLES D'ENTREE
DEUXIEME PARTIE

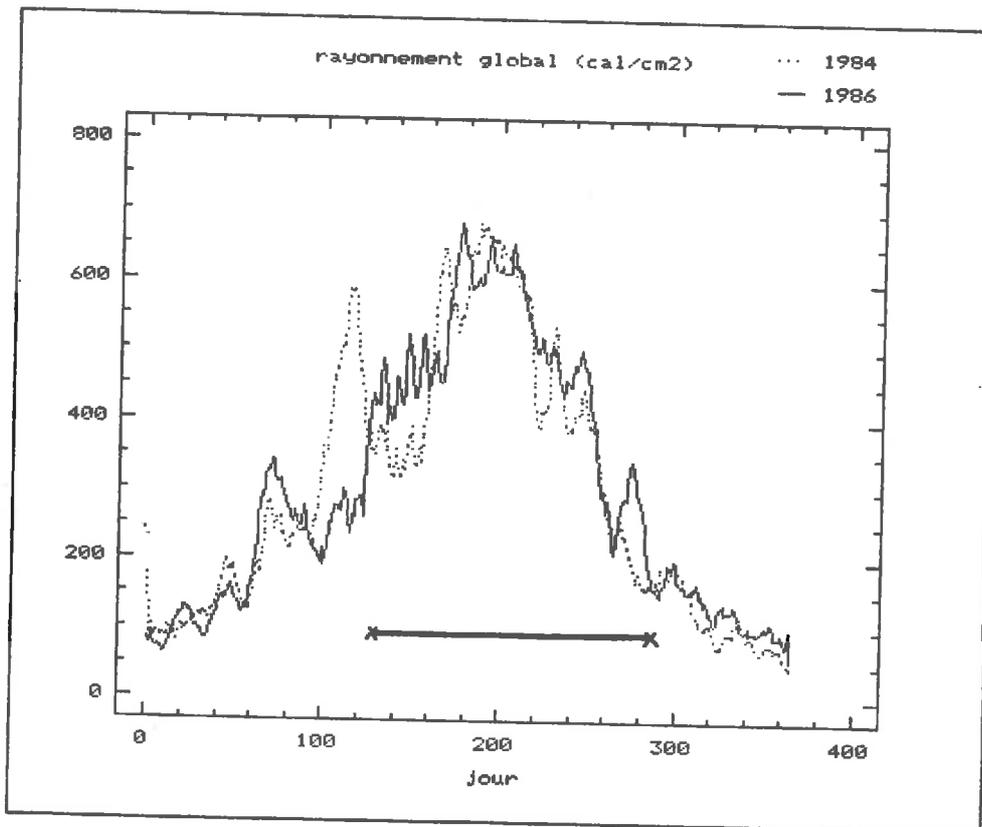
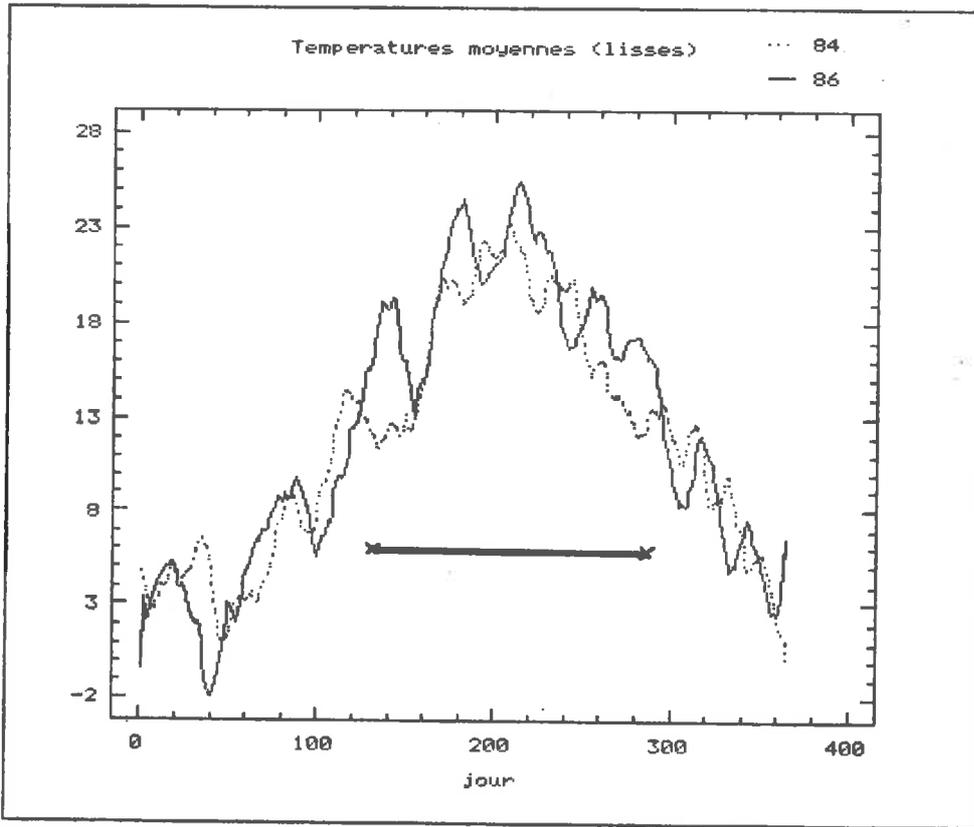
a	albedo
A	paramètre de la fonction d'évaporation sol nu (mm)
ABS(L)	absorption racinaire (mm/jour)
Aclim	composante climatique de A (mm)
arg	taux d'argile (%)
Asol	composante sol de A (mm)
C	maximum de rmax/ruu
Co	maximum de rmax/ruu sans sress hydrique
CR	coefficient liant rendement et consommation en eau
D	disponibilité en eau pour la plante(en mm ou en mm/jour)
d	distance moyenne entre 2 racines (cm)
Dr	drainage (en mm)
DRAIN1	drainage du réservoir 1 vers le réservoir 2 (mm)
E Drac(j)	somme de températures journalières (degrés jour)
EQ	évaporation à l'équilibre (mm/jour)
EP	évaporation potentielle théorique (mm/jour)
ES	évaporation réelle (mm/jour)
ES ₀	évaporation potentielle (mm/jour)
ET	évapotranspiration réelle (mm/jour)
ETP	évapotranspiration potentielle Penman (mm/jour)
ETP ₀	évapotranspiration maximale de la culture du soja (mm/j)
f	coefficient de Slabbers (seuil sensibilité stomatique)
F	fonction d'évaporation sol nu
fdens(z)	facteur de densité racinaire (su)
fstrac	seuil de sensibilité racinaire
fsturg	seuil de sensibilité de turgescence
GRORT	assimilats racinaires (g/jour/m ²)
Ha	humidité pondérale du sol sec (%)
Hcc	humidité pondérale à la capacité au champ (%)
Hi	humidité pondérale au début du dessèchement du sol (%)
Hpfp	humidité pondérale au point de flétrissement permanent (%)
k(θ)	conductivité hydraulique
kmax	coefficient cultural maximal (su)
l	n° de la couche
L	chaleur latente de vaporisation de l'eau
LAI	indice foliaire (su)
laimax	paramètres de la courbe k=f(lai)
laimin	
LAIreg	indice foliaire pondéré par la régularité de l'espacement
MS	matière sèche (g/m ²)
NDISP	eau non disponible pour la plante (mm)
P'	dérivée de la fonction de pression de vapeur saturante
PI	apports d'eau (en mm/jour)
prof	profondeur du sol (cm)
PSICr	potentiel critique
RDT	rendement (qx/ha)
RES	réserve en eau du sol (en mm)
RESTOT	réserve totale du réservoir '1 (mm)
RS	rayonnement global (mm/jour)
RLDF(L)	profil de répartition de longueur racinaire (%)
RLNEW	longueur racinaire produite (cm/jour)
RLV(L)	profil de densité racinaire (cm/mm)
RMAX	quantité d'eau maximale utilisable par le système racinaire (mm)

rmax	réserve maximale unitaire(en m/cm de sol)	
rmaxi	réserve maximale (mm/cm sol = Hcc . [s)	
rmini	réserve minimale (mm/cm sol = Hpfp . [s)	
RH	rayonnement net au dessus du couvert (mm/jour)	
RHsol	rayonnement net au niveau du sol (mm/jour)	
ro(z)	profil d'humidité initiale	
rom	réserve initiale moyenne (mm/cm sol)	
rnr	résistance hydraulique à l'interface sol/racine	
ruu	réserve utile unitaire (mm/cm de sol)	
Rui	ruissellement (en mm/jour)	
sa	albedo sol nu	
sphot	fonction de stress de photosynthèse ou stomatique (su)	SOYAMET
strac	fonction de stress racinaire (su)	
sturg	fonction de stress de turgescence (su)	
SWFAC	facteur de stress hydrique stomatique (SOYGRO)	
TD	température pondérée pour le calcul de EEQ (°C)	
TMAX	température maximale journalière (°C)	
TMIN	température minimale journalière (°C)	
TP	transpiration réelle (mm/jour)	
TPO	transpiration maximale (mm/jour)	
TURFAC	facteur de stress hydrique de turgescence (SOYGRO)	
U	limite d'évaporation du sol nu (mm)	
vitcroi	vitesse de croissance (cm/°C)	
WR(L)	profil de répartition de longueur racinaire de base (%)	
x	épaisseur du mulch (cm)	
xmax	profondeur du front racinaire (cm)	
zo	profondeur de semis (cm)	
xprof	paramètres de fdens(z) en cm	
xcomp		
xvit		
α	coefficient de la fonction d'évaporation en fonction du temps	
arac	paramètre de sénescence hydrique racinaire	
β	paramètre de calcul de la transpiration maximale en fonction de l'humidité du sol	
δ	constante psychométrique(0.66 mb°C-1)	
δes	coefficient d'extinction du sol (calcul de ESO-su)	
θ(L)	profil d'humidité volumique (mm/cm sol)	
τ	coefficient de priestley Taylor	
*r	potentiel racinaire	
*s	potentiel du sol	
ρs	densité apparente du sol	

ANNEXE 11

Caractéristiques thermiques et radiatives
pour la station de Valence en 1984 et 1986

↔ saison de la culture du soja



BIBLIOGRAPHIE

**GENERALITES SUR LES MODELES DE PRODUCTION
ET POTENTIALITES AGRICOLES**

- BAIER W., 1979. Note on the terminology of crop-weather models. *Agric. Meteorol.* 20 : 137-145
- BAKER D.W., 1980. Simulation for research and crop management. In: World Soybean Research Conference II : proceedings - CORBIN F.T. ed : 533-546
- BLANCHET R., DESCLAUX D., GELFI M., QUINONES H., 1988. Simulation des principales contraintes agronomiques dans différentes situations françaises. II-Exploration de situations variées. *C. R. Acad. Agric. Fr.* 74 (3) : 11-19
- BOIFFIN J., SEBILLOTE M., 1982. Fertilité, potentialité, aptitudes culturales. Signification actuelle pour l'agronomie. *Bull. Techn. Inf.* 370/372 : 345-353
- BROCHET P., GERBIER M., REMOIS P., 1977. Etude agrométéorologique du blé tendre d'hiver. Monographie n 101, *Météorologie Nationale.* 79 p.
- CHARPENTEAU J.L., JONES C.A., MARTY J.R., RELIER J.P., WILLIAMS J.R., 1986. Conduite des systèmes de grande culture et prévision des rendements : tentative de modélisation. *CR. Acad. Agric. Fr.* 72, 1: 118-124.
- DAGHELIE P., PALM E., ISTASSE A., 1983. Prévision de productions agricoles dans les dix pays de la Communauté Européenne. Rapport interne CEE : 37 p.
- DELECOLLE R., 1989. Indices, modèles et outils du zonage agropédoclimatique. In : Le zonage. *C. R. Comm. Agrométéorol., INRA* (à paraître)
- DERRON J.O., 1987. Utilité des modèles mathématiques dans la recherche agronomique. *Rev. Suisse Agric.* 19 (5) : 233-236
- FAO, 1979. Rapport sur le projet relatif aux zones agroécologiques. Rome, Italie N 48: 158 p.
- GIRARDIN P., 1982. Essais de modélisation de la croissance et du développement du maïs grain. Thèse, Université Paris-Sud : 145 p.
- HALL A.E., 1982. Mathematical models of plant water loss and plant water relations. *Physiological Plant Ecology II. New Series Vol. 12 B, chap. 8* : 231-261
- HODGES T., BOTNER D., SAKAMOTO C., HAYS HAUG J., 1987. Using the Ceres-maize model to estimate production for the U.S. Cornbelt. *Agric. For. Meteorol.* 40 : 293-303
- KING D., DAROUSSIN J., BONNETON P., NICOUILLAUD B., 1986. An improved method for combining map data. *Sol Use Manage.* 2 (4) : 140-145
- PRIMAULT B., 1969. D'une application pratique des indices bio-météorologiques. *Agric. Meteorol.* 6 : 71-96
- SANTIBANEZ F., 1983. Zonification agroclimatique du Chili méditerranéen intégrée à l'analyse agro-écologique. Pré-rapport du colloque de bioclimatologie méditerranéenne - Montpellier 1983 - CNRS ed. - V7 : 1-19.
- SANTIBANEZ F., 1986. Modélisation agroécologique appliquée à l'analyse et à la zonification de la production des cultures. Thèse de Doctorat. Université Paris VII. 327 pages.
- SINCLAIR T.R., 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I - Model development. *Field Crops Res.* 15 : 125-141
- TURC L., 1972. Indice climatique de potentialité agricole. *Sci. Sol* 2 : 81-102

WHISLER F.D., ACOCK B., BAKER D.W., FYE R.E., HODGES H.F., LAMBERT J.R., LEMMON H.E., MCKINION J.M., REDDY V.R., 1986. Crop simulation models in agronomic systems. Adv. Agro. 40 : 141-208

WILLIAMS J.R., JONES C.A., DYKE P.T., 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27 : 129-144

WILKERSON G.G., JONES J.W., BOOTE K.J., INGRAM K.T., MISHOE J.W., 1983. Modeling Soybean growth for crop management. Trans. ASAE 26 : 63-73

WILKERSON G.G., JONES J.W., BOOTE K.J., MISHOE J.W., 1985. SOYGRO V5.0 : Soybean crop growth and yield model. Internal report, Gainesville University, Florida, USA : 220 p.

PHYSIOLOGIE DE LA CULTURE DU SOJA ET MODELISATION

- BARET F., ALIOSO A., LUCIANI J.L., HANCOQ J.F., 1989. Estimation de l'énergie photosynthétiquement active absorbée par une culture de blé à partir des données radionétriques. Agronomie-publication
- BERRY J., BJORMAN O., 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 31 : 491-543
- BLANCHET R., GELFI N., BOSCH M., 1977. Relations entre consommation d'eau et production chez divers types variétaux. Ann. Agro. 28 : 261-275
- BLANCHET R., 1986. Conclusions générales. In Le soja - CETIOM éd. : 175-176.
- BLANCHET R., BOUNIOLS A., CONSTANT S., GELFI N., MARTY J.R., PUECH J., 1986. Biologie et formation du rendement de sojas déterminés et indéterminés en bonnes conditions culturales. Eurosoya 4 : 10-17
- BLANCHET R., HUGON C., BOUNIOLS A., GELFI N., 1987. Réponse comparée de sojas à croissance déterminée ou non à différentes ressources hydriques. Eurosoya 5 : 22-30
- BOARD J.E., HALL W., 1984. Premature flowering in soybean yield reductions at nonoptimal planting dates as influenced by temperature and photoperiod. Agron. J. 76 : 700-704
- BOOTE K.J., GALLAHER R.W., ROBERTSON W.K., HINSON K., HAMMOND L.C., 1978. Effect of foliar fertilization on photosynthesis, leaf nutrition, and yield of soybeans. Agron. J. 70 : 787-791
- BORTHWICK H.A., PARKER M.W., 1938. Influence of photoperiods upon the differentiation of meristems and the blossoming of biloxi soybeans. Bot. Gaz. 99 : 825-839
- BYTH J.E., 1968. Comparative photoperiodic responses for several soya bean varieties of tropical and temperate origin. Aust. J. Agric. Res. 19 : 879-890
- CALMES J., GELFI N., VIALA G., CAVALIE G., BLANCHET R., 1987. Photosynthèse et élaboration des réserves des graines chez divers types de soja à croissance indéterminée, semi-déterminée et déterminée. Agronomie 7 (1) : 33-40
- CREE K.J.(Mc), 1974. Equations for the rate of dark respiration of white clover grain sorghum as functions of dry weight, photosynthetic rate and temperature. Crop Sci. 14 (4) : 509-514
- CREE K.J.(Mc), 1981. I-Responses to the physical environment. Physiological Plant Ecology, Springer Verlag éd., Berlin, Vol 12 A : 41-56
- CRISWELL J.G., HUME D.J., 1972. Variation in sensitivity to photoperiod among early maturing soybean strains. Crop Sci. 12 : 657-660
- DAYDE J., ECOCHARD R., 1984. Elaboration de la matière sèche chez le soja. I- Comparaison des types déterminé et indéterminé. Agronomie 5 (2) : 127-134
- DELECOLLE R., GUERIF M., 1986. Les modèles agrométéorologiques de développement. Note interne n° M 86/9. Projet ESA "Utilité SAR" : 61 p.
- DURAND R., 1967. Action de la température et du rayonnement sur la croissance. Ann. Phys. Vég. 9 (1) : 5-27
- ECOCHARD R., DENUC M., AUSSEL P., 1978. Développement phasique et productivité du soja : étude variétale. Ann. Amélior. Plantes 28(4) : 351-370
- ECOCHARD R., 1986. La sensibilité du soja à la photopériode et la thermopériode. In : Le Soja - CETIOM éd. : 91-98

- FEHR W.R., CAVINESS C.K., BURMOOD D.T., PENNINGTON J.S., 1971. Stage of development descriptions for soybeans, glycine max (L.) Merrill. Crop Sci. 11 : 929-931
- GENEVOIS L., 1942. Le déterminisme de la floraison chez les sojas. Rev. Int. Soja 2 (10) : 81-98
- GIFFORD R.M., EVANS L.T., 1981. Photosynthesis, carbon partitioning and yield. Ann; Rev. Plant Phys. 32 : 485-509
- GODWIN D.C., VLEK P.L.G., 1985. Simulation of nitrogen effects. In : Wheat Growth and Modeling. E. FRY and T.K. ATKIN (eds.). Plenum publishing corporation, NATO-ASI Series : 293-305
- GOUDRIAAN J., 1982. Potential production processes. In : Simulation of plant growth and crop production. Penning de Vries, VanLaar (eds) PUDOC : 98-113
- GRIMA-PETTENATI J., BAILLY-FENECH G., LATCHE J.C., 1987. Etude comparative des migrations d'assimilats chez deux variétés de soja, type déterminé ou indéterminé. Agronomie 7(6) : 447-456
- HALLAIRE M., 1950. Les températures moyennes nocturnes, diurnes et nyctémérales exprimées en fonction du minimum et du maximum journaliers de température. C.R. Acad. Sci. 231 (25) : 1533-1535.
- HANWAY J.J., WEBER C.R., 1971. Dry matter accumulation in eight soybean. Agron. J. 63 : 227-231
- HESKETH J.D., MYHRE D.L., WILLEY C.R., 1973. Temperature control of time intervals between vegetative and reproductive events in soybeans. Crop Sci. 13 : 250-254
- HODGES T., FRENCH V., 1985. Soyphen : soybean growth stages modeled from temperature, daylength and water availability. Agron. J. 77 : 500-505
- JOHNSON H.W., BORTHWICK H.A., LEFFEL R.C., 1960. Effects of photoperiod and time of planting on rates of development of the soybean in various stages of the life cycle. Bot. Gaz. 122 (2) : 77-95
- JONES J.W., BOOTE K.J., JAGTAP S.S., MISHOE J.W., 1988(a). Soybean development. In : Modeling soil and plant systems, HANKS R.J., RITCHIE JT. (eds). ASA Monograph. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin 53711 : chap. 5
- JONES J.W., BOOTE K.J., JAGTAP S.S., HOOGENBOOM G., WILKERSON G.G., MISHOE J.W., 1988(b). SOYGRO V5.41 : Soybean crop growth and yield model. IBSNAT Version. Technical Documentation
- KENIG A., MISHOE J.W., JONES J.W., BOOTE K.J., 1987. Using soil and crop data bases in crop yield prediction. Trans ASAE.
- LATCHE J.C., CALMES J., GRIMA-PETTENATI J, VIALA G., CAVALIE G., 1986. Photosynthèse et métabolisme carboné et azoté du soja. In : Le Soja -CETIOM éd.: 47-52.
- MAJOR D.J., JOHNSON D.R., LUEDDERS V.D., 1975(a). Evaluation of eleven thermal units methods for predicting soybean development. Crop Sci. 15 : 172-174
- MAJOR D.J., JOHNSON D.R., TANNER J.W., ANDERSON I.C., 1975(b). Effects of daylength and temperature on soybean development. Crop Sci. 15 : 174-179
- MAJOR D.J., 1980. Photoperiod response characteristics controlling flowering of nine crop species. Can. J. Plant Sci. 60 : 777-784
- MERRIEN A., 1987. Cahier Technique Irrigation Soja - CETIOM éd. :28 p.
- MEYER G.E., CURRY R.B., STREETER J.G., BAER C.H., 1981. Simulation of reproductive processes and senescence in indeterminate soybeans. Trans. ASAE : 421-435

- MONTEITH J.L., 1981. Does light limit crop production ? In : Physiological processes limiting plant production - JOHNSON C.B. éd. BUTTERNOORTHS, LONDON : 23-38
- PAUL M.H., PLANCHON C., 1983. Transport et distribution d'assimilats pendant la phase floraison grossissement des graines chez un soja de type déterminé. C. R. Acad. Sci. tome 297 Série III : 405-410
- PEAT J.R., 1984. The role of source-sink interactions in cereals in controlling yield. In : Regulation of sources and sinks in crop plants : proceedings of symposium Yord : 227-242
- PENNING de VRIES F.W.T., 1974. Substrate utilization and response in relation to growth and maintenance in higher plants. Nieth. J. Agric. Sci. 22 : 40-44
- PENNING de VRIES F.W.T., 1975. The cost of maintenance processes in plant cells. Ann. Bot. 39 : 77-92
- PENNING de VRIES F.W.T., VAN LAAR H.H. (eds), 1982. Simulation of plant growth and crop production - PUDOC. 308 p.
- FIGEIRE A., 1984. Elaboration des composantes du rendement chez le soja de type indéterminé (cv Hodgson et Kingsoy). Thèse de Docteur Ingénieur, INP Toulouse : 163 p.
- POLSON D.E., 1972. Day neutrality in soybeans. Crop Sci. 12 : 773-776
- PRUDON E., MERRIEN A., 1986. Composantes du rendement chez le soja : variabilité génétique et effets du milieu. In : Le Soja - CETIOM éd. : 113-116
- PUECH J., 1986. Les tentatives successives d'introduction du soja en France et leurs conséquences. In Le soja - CETIOM éd. : 9-13
- PUECH J., BOUNIOLS A., 1986. Besoins en eau et en azote du soja : importance des phases sensibles. In : Le Soja - CETIOM éd. : 24-32
- SAKAMOTO C.M., SHAW R.H., 1967. Light distribution in field soybean canopies. Agron. J. 59 : 7-9
- SALADO-MAVARRO U.R., SINCLAIR T.R., HINSON K., 1985. Comparisons among effective filling period, reproductive period duration and R5 to R7 in determinate soybeans. Crop Sci. 25 : 1050-1054
- SEDDIGH M., JOLLIF G.D., 1984. Night temperature effects on morphology phenology, yield and yield components of indeterminate field grown Soybean. Agron. J. 76 : 824-828
- SHANMUGASUNDARAM S., TSOU S.C.S. 1978. Photoperiod and critical duration for flower induction in soybean. Crop Sci. 18 : 598-601
- SHIBLES R., FORD DM., SECOR J., 1989. Regulation of soybean leaf photosynthesis. In IV World Soybean Research Conference - Buenos Aires, Argentine. PASCAL AJ eds.
- SINCLAIR T.R., 1984. Leaf area development in field grown soybeans. Agron. J; 76 : 141-146
- SWANEY D.P., JONES J.W., MISHOE J.W., 1986. A combined simulation-optimization approach for predicting crop yields. Agric. Sys. 20 : 133-157
- VAN KEULEN H., SELIGMAN N.G., 1987. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. Simulation monograph, Pudoc, Wageningen, 310 p.
- VIDAL A., ASTRUC C., 1984. Etude comparative de la croissance et du développement de quelques variétés de soja. Eurosoya 2 : 39-46.
- WILKERSON G.G., JONES J.W., BOOTE K.J., INGRAM K.T., MISHOE J.W., 1983. Modeling Soybean growth for crop management. Trans. of ASAE 26 : 63-73

WILKERSON G.G., JONES J.W., BOOTE K.J., MISHOE J.W., 1985. SOYGRO V5.0 : Soybean crop growth and yield model. Internal report, Gainesville University, Florida, USA : 220 p.

WILLIAMS J.R., JONES C.A., DYKE P.T., 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE : 129-144

FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DE LA CULTURE DE SOJA ET MODELISATION

- AL-KHAFAF S., WIERENGA P.J., WILLIAMS B.C., 1978. Evaporative flux irrigated cotton as related to leaf area index, soil water, and evaporative demand. *Agron. J.* 70 : 912-917
- ARKIN G.F., RITCHIE J.T., ADAMS J.E., 1974. A method for measuring first-stage soil water evaporation in the field. *Soil Sci. Am. Proc.* 33 : 951-954
- BAIER W., 1969. Concepts of soil moisture availability and their effect on soil moisture estimates from a meteorological budget. *Agric. Meteorol.* 6 : 165-178
- BALL B.C., 1981. Modelling of soil pores as tubes using gas permeabilities, gas diffusivities and water release. *J. Soil Sci.* 32 : 465-481
- BLANCHET R., GELFI W., 1978. Relations entre développement foliaire, transpiration et production chez le soja/cv Amsoy 71 et Hodgson. *Ann Agron.* 29 : 223-242.
- BOESTEN J.J.T.I., STROOSNIJDER L., 1986. Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate. *Neth. J. Agric. Sci.* 34 : 75-90
- BOUZAZ A., BRUCKLER L., 1989. Modeling of wheat seedling growth and emergence. I-Seedling growth as affected by soil water potential. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* (in press).
- BOUNIOLS A., CHALAMET A., LAGACHERIE B., HERRIEN A., OBATON M., 1986. Nutrition azotée du soja : limites et améliorations de la fixation symbiotique. In : *Le Soja - CETIOM éd.* : 157-165
- BOYER J.S., 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Physiol.* 46 : 233-235
- BRADFORD K.J., HSIAO T.C., 1982. Physiological responses to moderate water stress. *Physiological Plant Ecology II*, Springer Verlag éd., Berlin. New Series Vol. 12 B, chap. 9 : 263-324
- BRUCKLER L., BERTUZZI P., GAUDU J.C., BRUNET Y., PASSERAT DE SILANS A., BALABANIS P., THONY J.L., VAUCLIN M., 1988. Transferts de masse et de chaleur entre le sol et l'atmosphère : comparaison entre modélisation et expérience in situ. In : *Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère - CALVET éd.* : 21-70
- CHANEY, 1990. Caractérisation de l'état hydrique de la surface du sol par radar - Thèse Docteur-Ingénieur INA-PG (en préparation)
- CHARTIER P., 1966. Etude du micro climat lumineux dans la végétation. *Ann. Agron.* 17 : 571-602
- CHILDS S.W., GILLEY J.R., SPLINTER W.E., 1977. A simplified model of corn growth under moisture stress. *Trans. ASAE* 20 (5) : 858-865
- CHOISWEL E., 1985. Un modèle agrométéorologique opérationnel de bilan hydrique utilisant des données climatiques. In : *Les besoins en eau des cultures - INRA, Paris* : 115-132
- CROUDHURY B.J., MONTEITH J.L., 1988. A four layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 114 : 373-398.
- CHUNG S.O., HORTON R., 1987. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resour. Res.* 23 (12) : 2175-2186
- CURRIE J.A., 1960. Gaseous diffusion in porous media. II-Dry granular materials. *British J. Appl. Phys.* 11 : 318-324
- de JONG R., 1988. Comparison of soil-water models under semi-arid growing conditions. *Can. J. Soil Sci.*, 68 : 17-27

- DENMEAD O.T.**, 1970. Relative significance of soil and plant evaporation in estimating evapotranspiration. Plant response to climatic factors. Proc. Uppsala Symp. Ecology and Conservation 5 : 505-511
- EAGLEMAN J.R.**, 1971. An experimentally derived model for actual evapotranspiration. Agric. Meteorol. 8 : 385-394
- ECK H.V., MATHERS A.C., MUSICK J.T.**, 1987. Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybeans. Field Crops Res. 17 : 1-16
- EGLI D.B., MECKEL L., PHILLIPS R.E., RADCLIFFE D., LEGGETT J.E.**, 1983. Moisture stress and N redistribution in soybean. Agron. J. 75 : 1027-1031
- EVANS M.L.**, 1984. Functions of hormones at the cellular level of organisation. In : Encyclopedia of plant physiology, New Series Vol. 10, Hormonal regulation of development. SCOTT T.K. - Ed. Springer Verlag, Berlin : 23-79
- FAO**, 1986. Yield response to water, Rome, Italie : 193 p.
- FEDDES R.A.**, 1985. Crop water use and dry matter production : state of the art. In : Les besoins en eau des cultures - INRA, Paris : 221-234
- FEDDES R.A.**, 1987. Crop factors in relation to making referencecrop evapotranspiration. In : Evaporation and water - TNO Committee on hydrological research, Hooghart J.C. éd. : 33-45
- FEDDES R.A., DE GRAAF M., BOUMA J., VAN LOON C.D.** 1988. Simulation of water use and production of potatoes as affected by soil compaction. Potato Research, 31 : 225-239.
- FOREST F., KALMS J.M.**, 1984. Influence du régime d'alimentation en eau sur la production du riz pluvial. Simulation du bilan hydrique. Agron. Trop. 39 (1) : 42-50
- FRANQUIN P., FOREST F.**, 1977. Des programmes d'évaluation et analyses fréquentielles des termes du bilan hydrique. Agron. Trop. 32 (1) : 1-22
- GILL K.S., PRIHAR S.S.**, 1983. Cultivation and evaporation effects on the drying patterns of sandy loam soil. Soil Sci. 135 (6) : 367-376
- HALLAIRE M.**, 1964 . Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. In : L'eau et la production végétale, INRA éd. : 27-62
- HANKS R.J.**, 1974. Model for predicting plant yield as influenced by water use. Agron. J. 66 : 660-665
- HILER E.A., CLARK R.W.**, 1971. Stress day index to characterize effects of water stress on crop yields. Trans. ASAE 14 (4) : 757-761
- HODGES T., FRENCH V.**, 1985. Soyphen : soybean growth stages modeled from temperature, daylength and water availability. Agron. J. 77 : 500-505
- HOOGLAND J.C., FEDDES R.A., BELMANS C.**, 1981. Root water uptake model depending on soil rate. Acta Hort. 119 : 123-136
- HOWEL T.A., MUSICK J.T.**, 1984. Relationship of dry matter production of field crops to water consumption. In : Les besoins en eau des cultures - INRA, Paris : 247-269
- JAMAGNE H., BETREMIEUX R., BEGON J.C., MORI A.**, 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. Bull. Techn. Inf., Min. Agri., Paris. N 324-641
- JONES C.A., KIRINY JR. (Eds)**, 1986. CERES-Maize : a simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press : 194 p.

- JONES C.A., BLAND W.L., RITCHIE J.T., WILLIAMS J.R., 1987. Simulation of root growth. American Society of Agronomy Meetings, Atlanta : 48 p.
- JONES J.W., SMAJSTRLA A.G., 1980. Application of modeling to irrigation management of soybeans. In : World soybean research conference II : Proceedings. CORBIN F.T. éd. Westview Press, Boulder, Colorado 80301 : 571-599
- KANEMASU E.T., STONE L.R., POWERS W.L., 1976. Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum. Agron. J. 68 : 569-572
- KATERJI H. et FERRIER A., 1985. Détermination de la résistance globale d'un couvert végétal à la diffusion de vapeur d'eau et de ses différentes composantes. Agric. Meteorol. 34 : 105-120.
- KING D. et DAROUSSIN J., 1988. Essai d'estimation de la réserve utile en eau des sols à partir de la carte des sols des communautés européennes à l'échelle du 1 000 000. In proceedings of a workshop in the community program for agricultural research - Wageningen : 87-106
- LAGOUARDE J.P., CHOISMEL E., 1989. A new agrometeorological model for evaporation and surface temperature (to be published in Agric. Meteorol.)
- LEMEUR R., 1973. A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, jerusalem artichoke, corn and soybean canopies using actual stand structure data. Agric. Meteorol. 12 (1473) : 229-247
- LHOMME J.P., ELDIR M., 1985. Un modèle agroclimatique de simulation du bilan hydrique des cultures. In : Les besoins en eau des cultures - INRA, Paris : 841-852
- MAERTENS C., CABELGUENNE M., 1974. Intensité et limite de dessèchement du sol en relation avec l'enracinement de quelques espèces végétales cultivées (Note). C. R. Acad. Sci. Paris, tome 279 Série D : 2039-2042
- MAERTENS C., 1986. Soja : système racinaire et exploitation du sol. In : Le Soja - CETIOM éd. : 33-37
- MAERTENS C., 1988. Intérêt de l'endoscopie pour l'étude de l'influence de l'enracinement d'un couvert végétal sur l'utilisation de l'eau du sol. In : Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère - Calvet éd. : 214-224
- MASSE J., COLWENNE C., YARDIKU F., CROSSON P., 1988. Système racinaire du blé et état structural du sol. Perspect. Agric. 128 : 31-37
- MERRIEN A., 1987. Cahier Technique Irrigation Soja - CETIOM éd. : 28 p.
- MEYER W.S., GREEN G.C., 1980. Water use by wheat and plant indicators of available soil water. Agron. J. 72 : 253-257
- MEYER W.S., GREEN G.C., 1981. Plant indicators of wheat and soybean crop water stress. Irrig. Sci. : 167-176
- PAUL M.H., PLANCHON C., ECOCHARD R., 1979. Etude des relations entre le développement foliaire, le cycle de développement et la productivité chez le soja. Ann. Amélior. Plant. 29 (5) : 479-492
- FERRIER A., 1973. Bilan hydrique de l'assolement blé-jachère et évaporation d'un sol nu en région semi-aride. Dans : Réponse des plantes aux facteurs climatiques. Actes Coll. Uppsala, 1970. Ecologie et Conservation 5 : 477-487
- FERRIER A., 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III- Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. Ann. Agron. 26 (3) : 229-243
- FERRIER A., 1981. Land surface processes : vegetation. In Land surface processes in atmospheric general circulation models - P.S. EAGLESON ed. : 395-448.

- FERRIER A.**, 1982. Modélisation des échanges de surface : continuum sol-plante-atmosphère. Ecole d'été CNES, Roscoff. Ouvrage climatologie : 33 p.
- PEYREMORETE P.**, **TRON G.**, 1987. Irrigation des cultures de soja et de tournesol. S.C.P.. Document interne : 58 p.
- PLANCHON C.**, **CALMES J.**, **BLANCHET R.**, 1986. Ecophysiologie du soja. II Adaptation aux conditions sèches. In Le soja - CETIOM ed. : 79-88
- PRIESTLEY C.H.B.**, **TAYLOR R.J.**, 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Mon. Weather Rev. 100 (2) : 81-92
- PROTOPAPAS A.L.**, **BRAS R.L.**, 1988. State-space dynamic hydrological modeling of soil-crop-climate interactions. Water Resources Res., vol 24, 10 : 1765-1779.
- PUECH J.**, **HERNANDEZ M.**, 1973. Evapotranspiration comparée de différentes cultures et étude de quelques facteurs influençant les rythmes de consommation. Ann. Agro. 24(4) : 437-455.
- PUECH J.**, **LENCREROT P.**, **HERNANDEZ M.**, 1974. Rôle des facteurs du milieu dans la production quantitative et qualitative du soja. Ann. Agro. 25(5) : 659-679.
- PUECH J.**, **BOUUIOLS A.**, 1986. Besoins en eau et en azote du soja : importance des phases sensibles. In : Le Soja - CETIOM éd. : 24-32
- PUECH J.**, **CABELGUENNE M.**, **HERNANDEZ M.**, 1986. Réponse du soja aux disponibilités hydriques. In : Le Soja - CETIOM éd. : 99-106
- RATLIFF L.F.**, **RITCHIE J.T.**, **CASSEL D.K.**, 1983. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 47 : 770-775
- RENAULT P.**, 1988. Etude et modélisation du coefficient de diffusion en phase gazeuse en fonction de la morphologie de l'espace poral textural des sols cultivés. Thèse, INP Toulouse.
- RITCHIE J.T.**, 1971. Dryland evaporative flux in a subhumid climate. I-Micrometeorological influences. Agron. J. 63 : 51-55
- RITCHIE J.T.**, 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resour. Res. 8 (5) : 1204-1213
- RITCHIE J.T.**, 1974. Atmospheric and soil water influences on the plant water balance. Agric. Meteorol. 14 : 183-198
- RITCHIE J.T.**, 1981(a). Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. Plant Soil 58 : 81-96
- RITCHIE J.T.**, 1981(b). Soil water availability. Plant Soil 58 : 327-338
- RITCHIE J.T.**, 1985(a). Evapotranspiration empiricisms for minimizing risk in rainfed agriculture. Advances in Evapotranspiration, Chicago : 139-150
- RITCHIE J.T.**, 1985(b). A user-oriented model for the soil water balance in wheat. In : Wheat Growth and Modeling, E. FRY and T.K. ATKIN (eds.). Plenum publishing corporation, NATO-ASI Series : 293-305
- ROBIN P.**, 1986. Calcul du bilan hydrique, évaluation et ajustement d'un modèle agronôméorologique. Mémoire de fin d'études, ENSA Montpellier, INA Paris-Grignon : 54 p.
- ROSENTHAL W.D.**, **ARKIN G.F.**, **SHOUSE P.J.**, 1985. Water deficit effects on sorghum transpiration. In : Advances in evapotranspiration, Chicago : 159-169
- SEGUIN B.**, 1975. Etude comparée des méthodes d'estimation d'ETP en climat méditerranéen du sud de la France (région d'Avignon). Ann. Agron. 26 (6) : 671-691

- SEGUIN B., 1977. Estimation de l'ETP en climat méditerranéen du sud-est de la France. Comparaison des méthodes à l'échelle locale et problèmes posés par l'extension à l'échelle régionale. Météorologie, Série VI N 11 : 33-40
- SEGUIN B., ITIER B., 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. Int. J. Remote Sensing 4 (2) : 371-383
- SINCLAIR T.R., 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. Field Crops Res. 15 : 125-141
- SINCLAIR T.R., MUCHOW R.C., LUDLOW M.M., LEACH G.J., LAWN R.J., FOALE M.A., 1987. Field and model analysis of the effect of water deficits on carbon and nitrogen accumulation by soybean, cowpea and black gram. Field Crops Res. 17 : 121-140
- SIONIT N., KRAMER P.J., 1977. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. Agron. J. 69 : 274-278
- SLABBERS P.J., 1977. Surface roughness of crops and potential evapotranspiration. J. Hydrol. 34 : 181-191.
- SLABBERS P.J., 1980. Practical prediction of actual evapotranspiration. Irrig. Sci. 1 : 185-196
- STONE J.A., KASPAR T.C., TAYLOR H.M., 1983. Predicting soybean rooting depth as a function of soil temperature. Agron. J. 75 : 1050-1054
- SUDAR R. A., SAKTON K.E., SPOMER R.G., 1981. A predictive model of water stress in corn and soybeans. Trans. ASAE. : 97-102
- TANNER C.B., JURY W.A., 1976. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. Agron. J. 68 : 239-243
- TARDIEU F., MANICHON H., 1987. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II-Croissance et disposition spatiale du système racinaire. Agronomie 7 (3) : 201-211
- TARDIEU F., 1988(a). Comment juger l'efficacité du système racinaire comme capteur d'eau ? Perspect. Agric. 128 : 21-25
- TARDIEU F. 1988(b). Etat structural de la couche labourée et enracinement. Perspect. Agric. 128 : 26-30
- VOLTZ M., RAMBAL S., 1987. Evaluation de CORNGRO: un modèle de simulation des transferts hydriques et de la croissance d'une culture de maïs. Agronomie 7 (9) : 727-738
- WILLIAMS J.R., JONES C.A., DYKE P.T., 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27 : 129-144
- WILSON R.G., ROUSE H.R., 1972. Moisture and temperature limits of the equilibrium evapotranspiration model. J. Appl. Meteorol. 11 : 436-442
- ZUR B., JONES J.W., BOOTE K.J., 1983. Field evaluation of a water relations model for soybean. I - Validity of some basic assumptions. Agron. J. 75 : 272-280

ABSTRACT

A soybean crop simulation model is studied in order to tackle agrometeorological questions and, more particularly, the theme of agricultural potentialities. This model, carried out by an American team, is firstly analysed, then adapted to our varietal conditions and finely modified in its hydrous functioning part.

SOYGRO is composed of interacting modules: growth development, senescence, water stress which, daily, describe the main physiological functions of the plant which lead to yield settlement. Initially, SOYGRO simulated late maturing varieties which are unsuited to our regions. So an adaptation to earlier maturing groups (00, I and II) is carried out, based on the model's genotypical parameters. Beforehand, a sensitivity analysis permits an evaluation of the required accuracy for those parameters.

An original water budget is elaborated. As the initial one, it separates bare soil evaporation and plant transpiration to lead to a response which is exclusively vegetable. This response is expressed by daily reduction functions corresponding with groups of physiological functions similar in their water stress sensitivity. Simple functions are used in order to minimise soil inputs (water budget of the "reservoir" pattern, empirical function for root density evolution) without neglecting essential phenomena of the hydrous functioning of the crop throughout its cycle (bare soil evaporation modelised from transfer analysis, adequacy of maximal transpiration to foliage surface...)

The reliability of the simulation tool, which has been settled, is evaluated by a series of comparisons between observed and simulated values in several soil and climatic conditions. It arises that, in spite of limitations due to phenomena that are not taken into account in the water budget or to incorrect simulation of the abortion process in limiting conditions, the behaviour of the model is globally satisfactory for agrometeorological needs.

With technical and genetic progress, the concept of agricultural potentialities can no longer be thought of as an intrinsic indicator of natural environment. It must be linked to a precise crop and must take into account a sort of grading of environmental constraints. In addition, this concept covers yield and also early sowing ability, drought resistance, cycle length..., all factors which can be accessed by crop simulation models, as is demonstrated in the conclusion.

RESUME

En prenant l'exemple du soja, une étude approfondie sur un modèle de simulation de culture, SOYGRO, est menée dans l'objectif d'étudier les questions d'ordre agrométéorologique et, en particulier, le thème des potentialités agricoles. Ce modèle, élaboré par une équipe américaine, est tout d'abord analysé en détail, puis adapté à nos conditions variétales et enfin modifié dans sa partie fonctionnement hydrique.

SOYGRO est structuré en modules qui interagissent : croissance, développement, sénescence, stress hydrique, qui, à un pas de temps journalier, décrivent les principales fonctions physiologiques de la plante contribuant à l'élaboration du rendement. A l'origine, SOYGRO simulait des variétés tardives inadaptées à nos régions, aussi une adaptation à des variétés plus précoces (groupes 00, I, II) est-elle réalisée à partir des paramètres génotypiques du modèle. Au préalable, une analyse de sensibilité permet d'apprécier la précision nécessaire à l'estimation de chacun de ces paramètres.

Un compartiment hydrique original est élaboré. Il reprend la structure du modèle initial en séparant évaporation du sol et transpiration de la plante afin d'aboutir à une réponse qui soit uniquement végétale. Cette réponse se traduit par le calcul de fonctions de réduction journalières correspondant à des familles de fonctions physiologiques proches par leur degré de sensibilité au déficit hydrique. L'originalité du modèle proposé tient dans l'utilisation de fonctions simples répondant à un souci de réduire les données d'entrées liées au sol (bilan hydrique de type "réservoir", description empirique de l'évolution de la densité racinaire,...), sans négliger la prise en compte des phénomènes essentiels du fonctionnement hydrique de la culture pendant l'ensemble de son cycle (modélisation de l'évaporation du sol nu à partir de l'analyse des transferts, adéquation de la transpiration maximale à l'abondance du feuillage,...).

La fiabilité de l'outil ainsi mis au point est évalué à travers une série de comparaisons entre des valeurs observées et les valeurs simulées dans diverses conditions de sol et de climat. Il ressort que, malgré quelques limitations liées à la non prise en compte de certains phénomènes dans le bilan hydrique ou à des problèmes dans la simulation des processus d'avortement en conditions limitantes, le comportement du modèle est globalement satisfaisant dans le cadre d'une utilisation agrométéorologique.

Avec les progrès techniques et génétiques le concept de potentialités agricoles ne peut plus s'apprécier comme un indicateur intrinsèque du milieu, il doit être lié à une culture précise et prendre en compte une certaine hiérarchisation des contraintes exercées par le milieu. De plus, ce concept intègre non seulement le rendement, mais aussi l'aptitude aux semis précoces, la résistance à la sécheresse, la longueur du cycle, ... autant de facteurs accessibles, de façon quantitative, par les modèles de simulation de culture, ainsi qu'il est démontré en conclusion de ce travail.

MOTS CLES : modélisation, simulation de culture, bilan hydrique, soja, potentialités agricoles, rendement, croissance, développement, contrainte hydrique.